



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharias

Ductilidade de Vigas de Betão Armado sujeitas à Torção

Mafalda Mangana Teixeira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(Ciclo de Estudos Integrado)

Orientador: Prof. Doutor Luís Filipe Almeida Bernardo

Covilhã, outubro de 2015

Aos meus Pais.

Agradecimentos

A realização desta dissertação não seria possível sem a colaboração e o contributo, de forma direta ou indireta, de algumas pessoas às quais quero aqui manifestar algumas palavras de agradecimento e reconhecimento.

Ao Professor Doutor Luís Filipe Almeida Bernardo, orientador científico desta dissertação, quero exprimir o mais sincero agradecimento pelo constante apoio, disponibilidade e por todo o conhecimento que me transmitiu, não só ao longo da elaboração desta dissertação como também ao longo do meu percurso académico.

Ao Professor Doutor Jorge Miguel de Almeida Andrade, autor do *software* TORQUE, quero agradecer pela disponibilidade e apoio prestado na explicação da utilização do respetivo *software* e das necessárias alterações feitas ao mesmo para a progressão deste trabalho.

Aos meus pais e ao meu irmão, um infinito agradecimento por todo o esforço e apoio, carinho e compreensão ao longo do meu trilha académico, proporcionando-me um futuro mais próspero.

Resumo

Neste trabalho é estudada a ductilidade de vigas de betão armado submetidas à torção pura, em particular vigas com secção retangular cheia e vazada.

Para tal, foi compilada informação sobre os resultados experimentais de vigas ensaiadas por diversos autores e encontrados na literatura consultada. Ao todo, juntou-se informação acerca de 120 vigas para este trabalho.

No início é feita uma análise comparativa do comportamento experimental das vigas de referência com o comportamento global teórico previsto para as mesmas. Posteriormente é feita a análise da ductilidade através da definição de um índice de ductilidade em torção.

Analisa-se e discute-se, de uma forma global, a influência de vários parâmetros característicos das vigas na evolução da ductilidade. Em causa estão a resistência do betão à compressão, a taxa total de armadura de torção, o desequilíbrio de armaduras, o fator de escala da secção e o tipo de secção (cheia ou vazada).

Os vários resultados são confrontados com as previsões de alguns documentos normativos internacionais, nomeadamente europeus, americanos e canadiano. É feita a verificação da adaptação das disposições normativas com o comportamento último observado para as vigas sujeitas à torção analisadas neste trabalho.

Palavras-chave

Vigas de betão armado, Torção, Ductilidade em torção, Resistência à torção

Abstract

In this thesis the ductility of reinforced concrete beams under pure torsion is studied, particularly, beams with plain and hollow rectangular sections.

For this, information about several experimental results of beams tested under torsion, from several authors found in the consulted literature, was compiled. In overall, information about 120 beams was gathered for this work.

An initial comparative analysis is made between the experimental behaviour of the reference beams and their global expected theoretical behaviour. Afterwards, the ductility analysis is performed by defining a torsional ductility index.

Then, the influence of several variable studies on the ductility is analysed and discussed, namely: the concrete compressive strength, the total reinforcement ratio for torsion, the unbalance level of reinforcement, the scale factor of the cross section and the geometrical section type (plain or hollow).

The results are compared with the predictions of international standard codes, namely Europeans, Americans and Canadian. The confirmation of the normative clauses with the ultimate behaviour observed for reference beams under torsion is then analysed.

Keywords

Reinforced concrete beams, Torsion, Ductility under torsion, Torsion strength

Índice

CAPÍTULO 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.1.1 Registo Histórico	1
1.1.2 Casos de Torção em Estruturas de Betão	5
1.1.3 Tipos de Torção	7
1.2 Conceitos Básicos para o Tema Investigado. Comportamento Tipo de uma Viga de Betão Armado sujeita à Torção	10
1.3 Objetivos e Justificação do Trabalho	12
CAPÍTULO 2 - Ductilidade de Vigas de Betão Armado	15
2.1 Introdução	15
2.2 Ductilidade em Vigas sujeitas à Flexão	16
2.3 Ductilidade em Vigas sujeitas à Torção	19
2.4 Ductilidade e Capacidade de Rotação em Torção de Vigas de Betão Armado com Secção Cheia e Vazada	23
2.5 Notas Finais	27
CAPÍTULO 3 - Disposições Normativas	29
3.1 Introdução	29
3.2 Código Americano, ACI 318R-89 [1]	29
3.2.2 Verificação da Segurança à Torção	30
3.2.3 Valor Nominal do Momento Torsor Resistente	30
3.2.3.1 Secções Retangulares Cheias	30
3.2.3.2 Secções Retangulares Ocas (Secções em Caixão)	32
3.2.4 Exigências para a Armadura de Torção	32
3.2.4.1 Constituição da Armadura de Torção	32
3.2.4.3 Armadura Máxima de Torção	34
3.2.4.4 Espaçamento das Armaduras	34
3.2.4.5 Outras Limitações Importantes	35

3.2.4.6 Alguns Detalhes Adicionais	35
3.3 Código Americano, ACI 318R-11 [2]	36
3.3.1 Disposições Gerais	36
3.3.2 Verificação da Segurança à Torção	37
3.3.3 Momento Torsor Resistente	37
3.3.3.1 Limitação da Tensão	37
3.3.3.2 Cálculo da Armadura de Torção	38
3.3.4 Exigências para a Armadura de Torção	40
3.3.4.1 Constituição e Pormenorização da Armadura de Torção	40
3.3.4.2 Armadura Mínima de Torção	41
3.3.4.3 Espaçamento Máximo das Armaduras	41
3.3.4.4 Outras Limitações Importantes	41
3.4 Código Europeu, MC90 [9]	42
3.4.1 Definições e Hipóteses Básicas	42
3.4.2 Torção Circulatória	42
3.4.2.1 Secções Transversais Ocas ou Poligonais Convexas	42
3.4.2.2 Secções Cheias	43
3.4.2.3 Fluxo de Corte e Forças de Corte	43
3.4.2.4 Efeitos das Ações	44
3.4.2.4 Verificações	44
3.4.2.4.1 Paredes não Fissuradas	44
3.4.2.4.2 Paredes com Fissuras Inclinadas	45
3.4.3 Armadura de Torção	48
3.4.3.1 Armadura Mínima não Específica para a Torção	48
3.4.3.2 Pormenorização da Armadura de Torção	49
3.5 Código Europeu, MC10 [10]	49
3.5.1 Generalidades	49
3.5.2 Armadura de Torção	51
3.5.2.1 Dimensionamento	51

3.5.2.2 Armadura Mínima não Específica à Torção	52
3.5.2.3 Pormenorização da Armadura de Torção	53
3.6 Código Europeu, EC2 [11]	53
3.6.1 Generalidades	53
3.6.2 Método de Cálculo	53
3.6.3 Armadura de Torção	56
3.6.3.1 Armadura Mínima e Máxima não Específica à Torção	57
3.7 Código Canadano, CSA A23.3-04 [14]	58
3.7.1 Considerações Gerais	58
3.7.2 Verificação da Segurança à Torção	58
3.7.3 Limitação da Tensão	59
3.7.4 Exigências para a Armadura de Torção	60
3.7.4.1 Constituição da Armadura de Torção	60
3.7.4.2 Armadura Mínima de Corte	61
3.8 Análise Comparativa entre Regulamentos. Conclusões	61
CAPÍTULO 4 - Análise da Ductilidade das Vigas de Referência	69
4.1 Introdução	69
4.2 Caracterização das Curvas $T - \theta$	69
4.3 Vigas de Referência	71
4.4 Caracterização e Análise Comparativa das Curvas $T - \theta$ Experimentais e Teóricas	74
4.5 Ductilidade em Torção	80
4.5.1 Definição do Índice de Ductilidade	80
4.5.2 Descrição do Método de Análise para o Estudo da Ductilidade em Torção	84
4.5.3 Influência da Resistência do Betão na Ductilidade em Torção	85
4.5.3.1 Influência da resistência do betão na ductilidade em torção segundo séries com taxas de armaduras semelhantes	85

4.5.3.2 Influência da resistência do betão na ductilidade em torção segundo séries com equilíbrio de armadura semelhantes	90
4.5.3.3 Influência da resistência do betão na ductilidade em torção segundo séries com fatores de escala iguais	93
4.5.4 Influência da Taxa de Armadura na Ductilidade em Torção	97
4.5.4.1 Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção segundo séries com resistência do betão semelhantes	97
4.5.4.2 Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção segundo séries com equilíbrio de armadura semelhantes	102
4.5.4.3 Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção segundo séries com fatores de escala iguais	105
4.5.5 Influência do Equilíbrio de “Volume” de Armadura na Ductilidade em Torção	109
4.5.5.1 Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção segundo séries de resistência do betão	109
4.5.5.2 Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção segundo séries com taxas de armadura semelhantes	111
4.5.5.3 Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção segundo séries com fatores de escala iguais	113
4.5.6 Influência do Fator de Escala na Ductilidade em Torção	115
4.5.6.1 Influência do fator de escala na ductilidade em torção segundo séries de resistência do betão semelhantes	116
4.5.6.2 Influência do fator de escala na ductilidade em torção segundo séries de taxa de armaduras semelhantes	117
4.5.7 Influência do Tipo de Secção na Ductilidade em Torção	121
4.5.7.1 Influência do tipo de secção na ductilidade em vigas equilibradas e fator de escala unitário	121
4.5.7.2 Influência do tipo de secção na ductilidade em vigas com armadura equilibradas e fator de escala não unitário	123

4.6 Notas finais	126
CAPÍTULO 5 - Comparação com Disposições Normativas	129
5.1 Introdução	129
5.2 Verificação das Limitações Normativas	129
5.2.1 Código Americano ACI 318R-89 [1]	130
5.2.2 Código Americano, ACI 318R-11 [2]	133
5.2.3 Código Europeu, MC90 [9]	135
5.2.4 Código Europeu, MC10 [10]	137
5.2.5 Código Europeu EC2 [11]	138
5.2.6 Código Canadano, CSA A23.3-04 [14]	139
5.3 Análise da Resistência à Torção	141
5.3.1 Código Americano ACI 318R-89 [1]	141
5.3.2 Código Americano, ACI 318R-11 [2]	144
5.3.3 Código Europeu, MC90 [9]	146
5.3.4 Código Europeu, MC10 [10]	148
5.3.5 Código Europeu EC2 [11]	150
5.3.6 Código Canadano, CSA A23.3-04 [14]	152
5.4 Análise da Limitação da Quantidade de Armadura	154
5.4.1 Código Americano ACI 318R-89 [1]	155
5.4.2 Código Americano, ACI 318R-11 [2]	158
5.4.3 Código Europeu, MC90 [9]	161
5.4.4 Código Europeu, MC10 [10]	162
5.4.5 Código Europeu EC2 [11]	163
5.4.6 Código Canadano, CSA A23.3-04 [14]	165
5.5 Notas Finais	166
 CAPÍTULO 6 - Conclusões e Recomendações para Estudos Futuros	 169
6.1 Introdução	169
6.2 Conclusões	169

6.3 Recomendações para Estudos Futuros	172
Bibliografia	173
Anexos	177

Lista de Figuras

Fig.1.1 - Ponte de Waterloo. (a) Registo fotográfico da ponte. (b) Pormenor da face inferior do tabuleiro. (c) Corte transversal do tabuleiro. [32, 21, 7]	2
Fig.1.2 - Royal Festival Hall. (a) Registo fotográfico do edifício. (b) Corte do edifício. (c) Vista do caixão triangular para suporte da laje em consola. [22, 7]	3
Fig.1.3 - Rotura frágil por torção de uma viga num edifício. [7]	4
Fig.1.4 - Lajes de cobertura em consola: (a) isolada. (b) com continuidade. [7]	5
Fig.1.5 - Edifícios com varandas: (a) de canto. (b) de balcão. [20, 7]	6
Fig.1.6 - (a) Ponte rodoviária em espiral. (b) Esquema de um troço da ponte e respetivo diagrama T. [19, 7]	6
Fig.1.7 - Vigas do tipo: (a) “T”. (b) “L”. [7]	7
Fig.1.8 - Apoio de uma laje inclinada numa viga de extremidade. [7]	7
Fig.1.9 - Torção: (a) de compatibilidade. (b) de equilíbrio. [7]	8
Fig.1.10 - Evolução da rigidez de torção com o momento torsor. [7]	8
Fig.1.11 - Simplificação dos modelos de cálculo. (a) Apoio de extremidade da laje. (b) Apoio de continuidade da laje. [7]	9
Fig.1.12 - Torção. (a) Circulatória. (b) Com empenamento. [7]	10
Fig.1.13 - Curva T - θ típica para uma curva de betão armado sujeita à torção pura. [28]	11
Fig.2.1 - Assentamento da fundação de um dos pilares da Ponte de Wassen na Suíça. [6]	15
Fig.2.2 - Redistribuição do diagrama de momentos fletores elásticos em vigas contínuas. [7]	17
Fig.2.3 - Redistribuição total do diagrama de momentos fletores elásticos. [7]	18
Fig.2.4 - Mecanismo resultante da redistribuição total do diagrama de momentos fletores elásticos. [7]	18
Fig.2.5 - Equilíbrio de uma fatia elementar de uma viga curva. [7]	20
Fig.2.6 - Redistribuição do diagrama dos momentos torsores elásticos em vigas contínuas com eixo curvo. (a) Rotação transversal livre no apoio central. (b) Rotação transversal restringida no apoio central. [7]	20

Fig.2.7 - Redistribuição total do diagrama dos momentos torsores. [7]	21
Fig.2.8 - Mecanismo de torção resultante da redistribuição total do diagrama dos momentos torsores. [7]	22
Fig.2.9 - Colapso estrutural de uma ponte rodoviária com eixo curvo. [7]	23
Fig.2.10 - Influência da espessura da parede no comportamento à torção pura. [7]	24
Fig.2.11 - Influencia da resistência do betão na ductilidade em torção. [7]	25
Fig.2.12 - Influencia da taxa de armadura na ductilidade em torção. [7]	25
Fig.2.13 - Influencia da resistência do betão na capacidade de rotação plástica em torção. [7]	26
Fig.2.14 - Influencia da taxa de armadura na capacidade de rotação plástica em torção. [7]	26
Fig.3.1 - Força de desvio sobre os varões longitudinais de canto. [1]	35
Fig.3.2 - Tubo de parede fina e fluxo de corte [2]	36
Fig.3.3 - Definição da área A_{oh} [2]	39
Fig.3.4 - Espessura efetiva e linha média do fluxo de corte (MC 90) [9].	43
Fig.3.5 - Noção de t_{eff} e z_i para as Eq.3.26 e Eq.3.27. [9]	44
Fig.3.6 - Parede sem fissuras. [9]	45
Fig.3.7 - Modelo de treliça plana para uma parede. [9]	45
Fig.3.8 - Possíveis soluções de pormenorização. (a) estribo em zona de compressão. (b) estribo em zona tracionada. [9]	49
Fig.3.9 - Definição da seção transversal oca tipo. [10]	50
Fig.3.10 - Notações e definições. [11]	54
Fig.3.11 - Exemplos de soluções para as cintas. [11]	57
Fig.4.1 - Caracterização de uma curva $T - \theta$ genérica	70
Fig.4.1 - Principais características geométricas. (a) Secção retangular cheia. (b) Secção retangular vazada [32].	72
Fig.4.3 - Casos de comportamento dúctil em torção pura. Vigas de Hsu [18]: (a) Viga G7; (b) Viga D3; (c) Viga I6.	77
Fig.4.4 - Relação tensão-extensão do betão comprimido, segundo o EC2 [11].	78
Fig.4.5 - Marcação dos pontos de “cedência” do betão nas curvas $T - \theta$. Vigas de Hsu [18]: (a) Viga D3; (b) Viga I6.	79

Fig.4.6 - Exemplificação do processo de interpolação dos pontos de cedência dos materiais. Viga B3 de Hsu [18].	80
Fig.4.7 - Definição do ponto de cedência da curva $T - \theta$.	82
Fig.4.8 - Definição do ponto último da curva $T - \theta$ [7]. (a) Curva com ramo descendente extenso. (b) Curva com ramo descendente curto.	83
Fig.4.9 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).	86
Fig.4.10 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).	87
Fig.4.11 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores experimentais - secção vazada).	88
Fig.4.12 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores teóricos - secção vazada).	89
Fig.4.13 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).	91
Fig.4.14 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).	91
Fig.4.15 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção vazada).	92
Fig.4.16 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção vazada).	93
Fig.4.17 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores experimentais - secção cheia).	94
Fig.4.18 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores teóricos - secção cheia).	95
Fig.4.19 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries de fatores de escala iguais (valores experimentais - secção vazada).	96
Fig.4.20 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries de fatores de escala iguais (valores teóricos - secção vazada).	96
Fig.4.21 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores experimentais - secção cheia).	98
Fig.4.22 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores teóricos - secção cheia).	99

Fig.4.23 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores experimentais - secção vazada).	100
Fig.4.24 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores teóricos - secção vazada).	101
Fig.4.25 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).	103
Fig.4.26 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).	103
Fig.4.27 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção vazada).	104
Fig.4.28 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção vazada).	105
Fig.4.29 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores experimentais - secção cheia).	106
Fig.4.30- Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores teóricos - secção cheia).	107
Fig.4.31 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores experimentais - secção vazada).	108
Fig.4.32 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores teóricos - secção vazada).	108
Fig.4.33 - Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores experimentais - secção cheia).	110
Fig.4.34 - Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores teóricos - secção cheia).	111
Fig.4.35 - Influência do equilíbrio de armaduras na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).	112
Fig.4.36 - Influência do equilíbrio de armaduras na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).	113
Fig.4.37 - Influência do equilíbrio de armaduras na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores experimentais - secção cheia).	114
Fig.4.38 - Influência do equilíbrio de armaduras na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores teóricos - secção cheia).	115

Fig.4.39- Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores experimentais - secção cheia).	116
Fig.4.40 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores teóricos - secção cheia).117	
Fig.4.41 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).	118
Fig.4.42 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).	119
Fig.4.43 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).	120
Fig.4.44 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).	120
Fig.4.45 - Influência do tipo de secção na ductilidade em torção, em vigas de armadura equilibrada e fator de escala unitário (valores experimentais).	122
Fig.4.46 - Influência do tipo de secção na ductilidade em torção, em vigas de armadura equilibrada e fator de escala não unitário (valores teóricos).	123
Fig.4.47 - Influência do tipo de secção na ductilidade em torção, em vigas de armadura equilibrada e fator de escala não unitário (valores experimentais).	125
Fig.4.48 - Influência do tipo de secção na ductilidade em torção, em vigas de armadura equilibrada e fator de escala não unitário (valores teóricos).	125
Fig.5.1 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do ACI 318R-89 [1].	142
Fig.5.2 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do ACI 318R-11 [2].	145
Fig.5.3 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do MC90 [9].	147
Fig.5.4 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do MC10 [10].	149
Fig.5.5 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do EC2 [11].	151
Fig.5.6 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do CSA A23.3-04 [14].	153
Fig.5.7 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (ACI 318R-89 [1]) - vigas com armadura equilibrada.	156
Fig.5.8 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (ACI 318R-89 [1]) - vigas com armadura não equilibrada.	156

Fig.5.9 - Intervalos das taxas mínimas para a armadura longitudinal de torção (ACI 318R-89 [1]) - vigas com armadura não equilibrada.	157
Fig.5.10 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (ACI 318R-11 [2]) - vigas com armadura equilibrada.	159
Fig.5.11 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (ACI 318R-11 [2]) - vigas com armadura não equilibrada.	159
Fig.5.12 - Intervalos das taxas mínimas para a armadura longitudinal de torção (ACI 318R-11 [2]) - vigas com armadura não equilibrada.	160
Fig.5.13 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (MC90 [9])	162
Fig.5.14 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (MC10 [10])	163
Fig.5.15 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (EC2 [11])	164
Fig.5.16 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (CSA A23.3-04 [14])	165

Lista de Quadros

Quadro 3.1 - Limitação da espessura para a secção transversal de um elemento sujeito à torção	61
Quadro 3.2 (cont.) - Limitação da espessura para a secção transversal de um elemento sujeito à torção.	62
Quadro 3.2 - Cálculo das tensões e forças de corte devidas à torção.	62
Quadro 3.2 (cont.) - Cálculo das tensões e forças de corte devidas à torção.	63
Quadro 3.3 - Verificação das condições de segurança à torção.	63
Quadro 3.3 (cont.) - Verificação das condições de segurança à torção.	64
Quadro 3.4 - Tensão limite para garantir a ductilidade.	64
Quadro 3.3 - Especificidades para a armadura transversal de torção.	65
Quadro 3.4 (cont.) - Especificidades para a armadura transversal de torção.	66
Quadro 3.5 - Especificidades para a armadura longitudinal de torção.	67
Quadro 4.1 - Designação das vigas de referência segundo a publicações dos autores.	71
Quadro 4.2 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com taxas de armadura semelhantes e resistências do betão variáveis.	86

Quadro 4.3 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com taxas de armadura semelhantes e resistências do betão variáveis.	88
Quadro 4.4 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e resistências do betão variáveis.	90
Quadro 4.5 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e resistências do betão variáveis.	92
Quadro 4.6 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com fatores de escala iguais e resistências do betão variáveis	94
Quadro 4.7 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com fatores de escala iguais e resistências do betão variáveis	96
Quadro 4.8 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com resistência do betão semelhantes e taxas de armaduras variáveis.	98
Quadro 4.9 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com taxas de armadura semelhantes e resistência do betão variáveis.	100
Quadro 4.10 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e taxas de armaduras variáveis.	102
Quadro 4.11 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e taxas de armadura variáveis.	104
Quadro 4.12 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com fatores de escala iguais e taxas de armadura variáveis.	106
Quadro 4.13 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com fatores de escala iguais e taxas de armadura variáveis.	108
Quadro 4.14 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com resistência do betão semelhantes e valores de equilíbrio de armaduras variáveis.	110
Quadro 4.15 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com taxas de armadura semelhantes e valores de equilíbrio de armadura variáveis.	112
Quadro 4.16 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com fatores de escala iguais e valores de equilíbrio de armaduras variáveis	114
Quadro 4.17 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com resistência do betão semelhantes e fatores de escala variáveis.	116
Quadro 4.18 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com taxas de armadura semelhantes e fatores de escala variáveis.	118
Quadro 4.19 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e fatores de escala variáveis.	119

Quadro 4.20 - Agrupamento de vigas com armaduras equilibradas e fator de escala unitário.	122
Quadro 4.21 - Agrupamento de vigas com armaduras equilibradas e fator de escala não unitário.	124
Quadro 5.1 - Vigas que não cumprem as disposições do código americano ACI 318R-89 [1].	131
Quadro 5.2 - Vigas que não cumprem as disposições do código americano ACI 318R-11 [2].	134
Quadro 5.3 - Vigas que não cumprem as disposições do MC 90 [9]	136
Quadro 5.3 - Vigas que não cumprem as disposições do MC 90 [9]	137
Quadro 5.5 - Vigas que não cumprem as disposições do EC2 [11]	139
Quadro 5.6 - Vigas que não cumprem as disposições do CSA A23.3-04 [14].	140
Quadro 5.7 - Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])	142
Quadro 5.8 - Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (ACI 318R-11 [2])	144
Quadro 5.9 - Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (MC90 [9])	147
Quadro 5.10 - Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (MC10 [10])	149
Quadro 5.11 - Médias para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (EC2 [11])	151
Quadro 5.12 - Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (CSA A23.3-04 [14])	153

Simbologia

Letras Maiúsculas Latinas

A	área limitada pelo perímetro exterior da secção
A_c	área da secção transversal, incluindo a área oca em peças vazada
A_{cp}	área limitada pelo perímetro exterior da secção
A_{ef}	área limitada pela linha média das paredes
A_g	área de betão
A_k	área efetiva da secção transversal
A_l	área de armadura longitudinal de torção
$A_{l,ef}$	área efetiva de armadura longitudinal de torção
$A_{l,min}$	área mínima de armadura longitudinal de torção
A_o	área limitada pela linha média do fluxo de corte
A_{oh}	área limitada pela linha média da armadura transversal de torção
A_{si}	área de armadura longitudinal ordinária na parede i
$A_{st,i}$	área da armadura transversal de torção na parede i
A_{swi}	área de um ramo de armadura transversal na parede i
A_t	área de um ramo da armadura transversal de torção
$A_{t,ef}$	área efetiva de um ramo da armadura transversal de torção
$A_{t,máx}$	área máxima de um ramo da armadura transversal de torção
$A_{t,min}$	área mínima de um ramo da armadura transversal de torção
C_s	distância entre a face exterior e a linha que une os eixos das armaduras longitudinais
E_c	valor médio do módulo de elasticidade do betão
E_s	valor médio do módulo de elasticidade do aço
F_{lt}	força desenvolvida na armadura longitudinal
F_{Rcwi}	força de compressão resistente na parede i
F_{Rli}	força longitudinal resistente na parede i
F_{Rtwi}	força transversal resistente na parede i
F_{Scwi}	força de compressão atuante na parede i
F_{Sli}	força longitudinal atuante na parede i
F_{Stwi}	força transversal atuante na parede i
$(GC)^I$	rigidez de St. Venant
$(GC)^{II}$	rigidez de torção pós-fissuração
M	momento fletor

T	momento torsor
T_c	valor nominal do momento torsor resistente conferido pelo betão
T_{cr}	momento torsor de fissuração
T_{cy}	momento torsor correspondente à “cedência” do betão
T_{Ed}	momento torsor atuante
T_f	momento torsor reduzido na secção transversal
T_{ly}	momento torsor de cedência da armadura longitudinal
T_n	momento torsor resistente
T_r	momento torsor resistente / momento torsor máximo
$T_{r,calc}$	valor de cálculo do momento torsor resistente
$T_{Rd,m\acute{a}x}$	momento torsor resistente máximo
$T_{r,exp}$	momento torsor experimental resistente
T_s	valor nominal do momento torsor resistente conferido pela armadura de torção
T_{sd}	momento torsor atuante
$T_{sd,ef}$	momento torsor efetivo
T_{ty}	momento torsor de cedência da armadura transversal
T_u	momento torsor reduzido / momento torsor último convencional
T_y	momento torsor de cedência
V	esforço transversal
$V_{Ed,i}$	esforço transversal atuante na parede i
$V_{Rd,c}$	força resistente ao corte conferida pelo betão
$V_{Rd,m\acute{a}x}$	esforço resistente máximo transversal
$V_{Rd,s}$	força resistente ao corte conferida pela armadura de corte
$V_{sdi,t}$	força de corte atuante na parede i devida à torção

Letras Minúsculas Latinas

b	dimensão da base da secção
b_w	largura da alma da secção / espessura da parede i
cv	coeficiente de variação
d_k	diâmetro do círculo que pode ser inscrito na parte mais estreita da secção transversal
f'_c	tensão de rotura do betão à compressão
f_{cd}	tensão de rotura do betão à compressão
f_{ck}	valor característico da tensão de rotura do betão à compressão
f_{cm}	valor médio da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ct}	tensão de rotura do betão à tração simples
f_{ctk}	valor característico da tensão de rotura do betão à tração simples

f_{ctm}	valor médio da tensão de rotura do betão à tração
f_{lym}	tensão média de cedência da armadura longitudinal
f_{tym}	tensão média de cedência da armadura transversal
f_y	tensão de cedência à tração do aço das armaduras
f_{yd}	tensão de cedência da armadura ordinária
$f_{y,ef}$	tensão de cedência efetiva da armadura
f_{yk}	valor característico da tensão de cedência à tração do aço de armadura
f_{yl}	tensão de cedência da armadura longitudinal
$f_{y,m\acute{a}x}$	tensão de cedência máxima das armaduras
f_{yt}	tensão de cedência da armadura transversal
f_{ywd}	valor da tensão de cedência do aço da armadura transversal
h	altura da secção / espessura da parede transversal
k_c	fator de redução do betão
$m_{b,ef}$	valor de cálculo do equilíbrio de “volume” de armaduras
p_c	perímetro exterior da secção transversal
p_{cp}	perímetro exterior da secção transversal
p_h	perímetro da linha média da armadura transversal de torção
s	espaçamento longitudinal entre cintas / desvio padrão
$s_{l,ef}$	espaçamento efetivo entre varões longitudinais
$s_{l,m\acute{a}x}$	espaçamento entre varões longitudinais
$s_{t,ef}$	espaçamento longitudinal efetivo entre cintas
s_t	espaçamento longitudinal entre cintas
$s_{t,m\acute{a}x}$	espaçamento longitudinal máximo entre cintas
t	espessura da parede transversal
t_{ef}	espessura efetiva da secção transversal cheia
t_{efi}	espessura efetiva da parede i
t_{real}	espessura da parede de uma secção vazada
u	perímetro exterior da secção transversal
u_k	perímetro exterior da secção transversal
u_s	perímetro da cinta
u_{ef}	perímetro da cinta
x	menor dimensão exterior de uma secção transversal retangular / largura da secção transversal
x_1	menor distância entre eixos dos ramos das cintas transversais
\bar{x}	valor médio
y	maior dimensão exterior de uma secção transversal retangular / altura da secção transversal
y_1	maior distância entre eixos dos ramos das cintas transversais

z_i distância entre os pontos de intersecção da linha média da parede i com as das paredes adjacentes

Letras Minúsculas Gregas

α ângulo entre a armadura transversal e o eixo do elemento

α_t coeficiente de eficiência

Δ_u deformação correspondente à carga última de flexão

Δ_y deformação correspondente à carga de cedência das armaduras em flexão

δ coeficiente de redistribuição

ε_o extensão correspondente ao pico de tensão do betão

ε_{c2} extensão correspondente à resistência máxima atingida pelo betão segundo o diagrama parábola-retângulo

ε_{c3} extensão correspondente à resistência máxima atingida pelo betão segundo o diagrama bi-linear

ε_{cu} valor convencional da extensão última do betão

ε_{lu} valor último convencional da armadura longitudinal

ε_{tu} valor último convencional da armadura transversal

θ rotação transversal por unidade de comprimento / ângulo entre diagonais de betão comprimido e eixo do elemento

θ_{cr} rotação de torção correspondente a T_{cr}

θ_{cy} rotação correspondente a T_{cy} ;

θ_{ly} rotação correspondente a T_{ly}

θ_r rotação correspondente a T_r ;

θ_{ty} rotação correspondente a T_{ty}

θ_u rotação correspondente a T_u / rotação última à torção

θ_u^{exp} rotação experimental última à torção

θ_u^{teo} rotação teórica última à torção

θ_y rotação correspondente a T_y / rotação de cedência à torção

θ_y^{exp} rotação experimental de cedência à torção

θ_y^{teo} rotação teórica de cedência à torção

λ fator de modificação / fator que contabiliza betão leves

μ_θ índice de ductilidade à torção

μ_θ^{exp} índice experimental de ductilidade à torção

μ_θ^{teo} índice teórico de ductilidade à torção

v coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal

ρ_l taxa de armadura longitudinal

$\rho_{l,min}$	taxa mínima de armadura longitudinal
ρ_t	taxa de armadura transversal
$\rho_{t,máx}$	taxa máxima de armadura transversal
$\rho_{t,min}$	taxa mínima de armadura transversal
ρ_{tot}	taxa total de armadura
$\rho_{tot,m}$	valor médio de taxa de armadura de torção
$\rho_{w,min}$	taxa mínima de armadura transversal
$\sigma_{ct,máx}$	tensão máxima do betão à tração simples
σ_s	tensão de tração da armadura
τ	tensão tangencial de torção
$\tau_{t,i}$	tensão tangencial devida à torção na parede i
ϕ	fator de redução de resistência / diâmetro de um varão
$\phi_{l,ef,canto}$	diâmetro efetivo de varões longitudinais de canto
$\phi_{l,min}$	diâmetro mínimo de varões longitudinais
ϕ_s	fator de resistência das armaduras

Lista de Acrónimos

ACI	American Concrete Institute
CEB	Comité Européen du Béton
CSA	Canadian Standards Associat
EC	Eurocode
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
GSVATM	Generalized Softened Variable Angle Truss-Model
MC	Model Code
PTP	Parâmetro de tendência plástica
SI	Sistema Internacional
VATM	Variable Angle Truss-Model

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1 Enquadramento

O momento torsor constitui um dos esforços internos, conjuntamente com o momento fletor, esforço transversal e esforço axial, passível de ocorrer num elemento linear, como por exemplo uma viga, para equilibrar um carregamento externo. Entende-se por momento torsor a soma algébrica dos momentos existentes sobre uma determinada peça e orientados segundo o eixo longitudinal dessa peça, representando-se o momento torsor resultante através de um vetor com dupla seta em cada uma das extremidades da peça em causa e de sentido oposto. De outro modo, o momento torsor é o esforço interno que resulta da existência de momentos relativamente aos centros de corte das secções transversais de uma peça linear. Utiliza-se para a notação de momento torsor o símbolo M_T ou simplesmente T . Esta última notação será a utilizada ao longo do presente trabalho.

1.1.1 Registos Históricos

Até à década de 60, o esforço de torção em estruturas de betão armado era em geral desprezado, quer por projetistas, quer por códigos e regulamentos. Dado não ser considerado um esforço primordial, acreditava-se que de algum modo esse mesmo esforço era absorvido por redistribuições internas de esforços nas estruturas e a segurança era garantida pela reserva de resistência que os coeficientes de segurança à flexão proporcionavam.

Os primeiros elementos estruturais de betão armado a considerar explicitamente a torção como esforço atuante principal no seu dimensionamento, foram as estacas-parafuso (*screw piles*). Estas fundações eram constituídas por estacas pré-fabricadas de betão armado que incorporavam uma armadura transversal helicoidal específica para resistir ao momento torsor. A cravação era feita por meios mecânicos, onde as estacas eram simultaneamente comprimidas e torcidas. A magnitude do momento torsor era pré-determinada consoante o método de cravação e o cálculo da armadura determinada com base em bibliografia especializada e ensaios experimentais existentes na época.

Foi na década de 40 do século passado, que a ambição de dois projetos londrinos impulsionou, na comunidade científica, um sentimento de necessidade de estudar adequadamente a problemática da torção no betão armado.

O primeiro projeto era destinado à Ponte de Waterloo. Esta obra foi desenhada por Sir Giles Gilbert Scott e entregue aos engenheiros Ernest Buckton e John Cuerel. Foi construída sobre o rio Tamisa entre 1942 e 1945. Para esta ponte foram concebidas duas vigas em caixão (com três células cada) para formar o elemento principal do tabuleiro. Contudo, o seu projeto previa a existência de cargas excêntricas elevadas sobre as vigas em caixão que provocariam grandes momentos torsores sobre as mesmas. Dada a falta de informação técnica, foram construídas e ensaiados modelos de vigas de secção retangular cheia e oca nas proporções médias da viga da ponte. O objetivo destes ensaios era confirmar que o fator de forma para a rigidez de torção de um retângulo oco com núcleo excêntrico era o mesmo do que o fornecido pela teoria de St. Venant para um retângulo cheio de proporções similares. Os fatores de forma foram encontrados como sendo idênticos e observou-se que a tensão tangencial máxima na viga em caixão ocorria na parede mais fina.

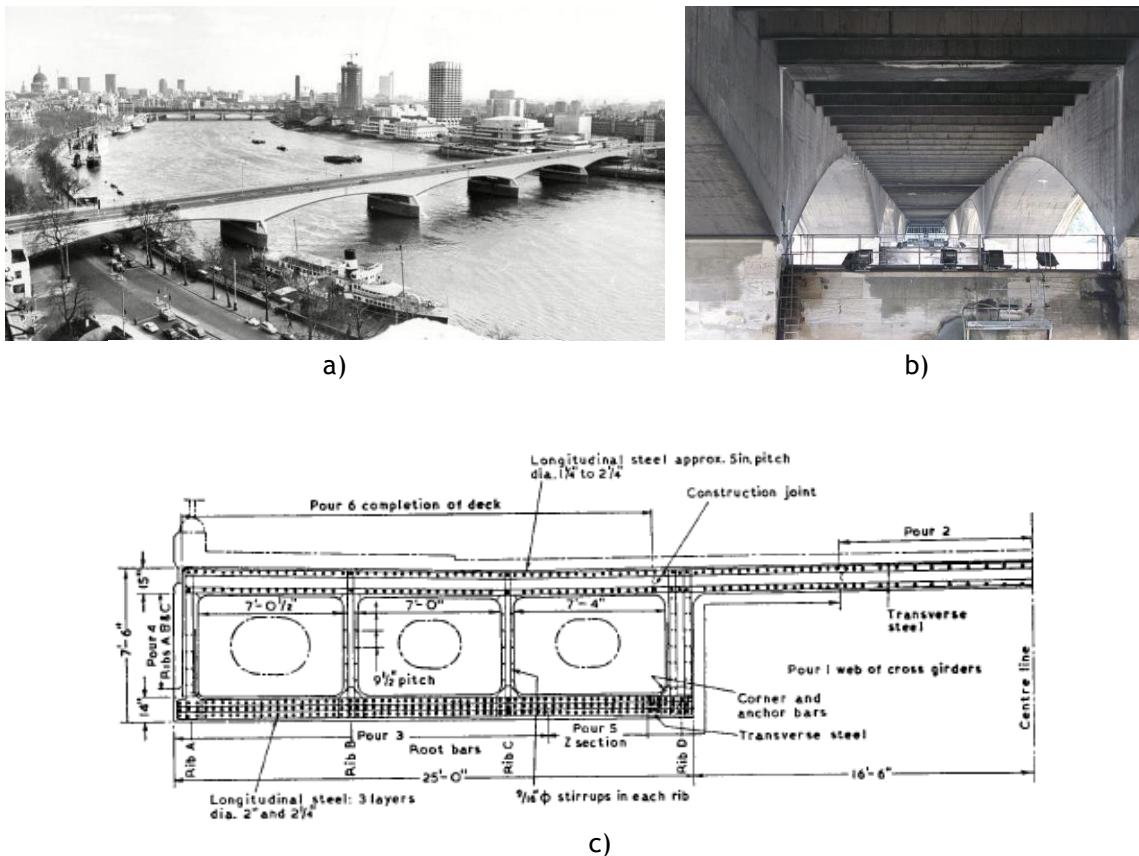


Fig.1.1 - Ponte de Waterloo. (a) Registo fotográfico da ponte. (b) Pormenor da face inferior do tabuleiro. (c) Corte transversal do tabuleiro. [32, 21, 7]

O segundo projeto era destinado ao Royal Festival Hall. Este auditório, ousado para a época, foi projetado por uma equipa de jovens arquitetos e engenheiros liderada pelos arquitetos Sir Robert Mathew e Dr Leslei Martin. A sua construção teve início em 1948 e levou 18 meses a ser concluída. O desafio desta equipa foi conceber e dimensionar uma viga em caixão, com secção triangular, sujeita a um esforço de torção elevado originado por uma laje em consola que a viga tinha de suportar. O desafio foi grande pois a equipa não possuía informação

técnica suficiente sobre esta matéria e não há registos de se terem realizado ensaios experimentais para simular esta situação.

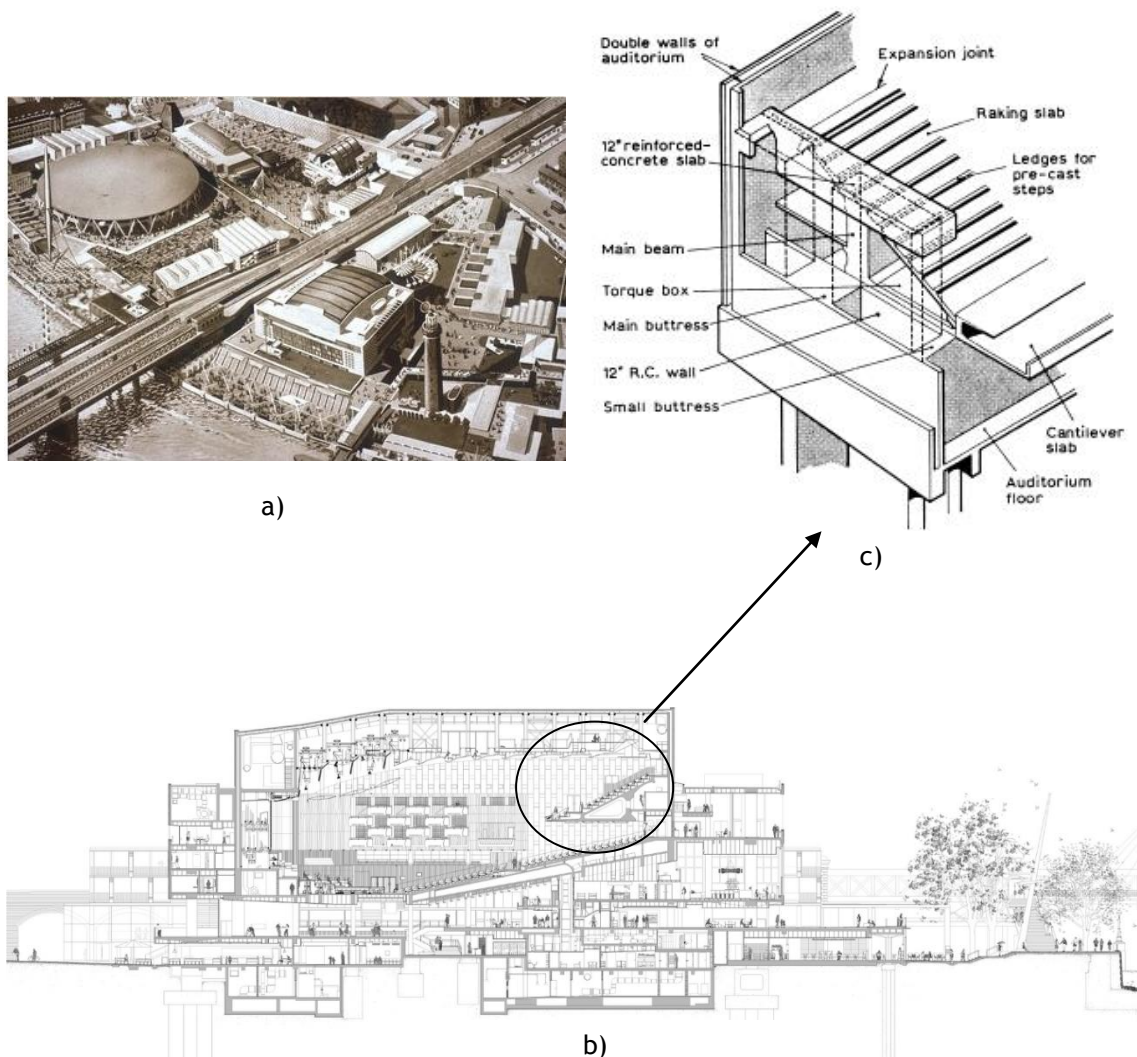


Fig.1.2 - Royal Festival Hall. (a) Registo fotográfico do edifício. (b) Corte do edifício. (c) Vista do caixão triangular para suporte da laje em consola. [22, 7]

Ainda na década de 40 do século passado, após a segunda guerra mundial, verifica-se a ocorrência de um “boom” de modernização na arquitetura. Esta deixa de ser “plana” e ganha dimensões espaciais com formas complexas e irregulares. Esta nova conceção de estruturas originaram carregamentos de grande excentricidade que não permitiam o desprezar dos efeitos dos mesmos no processo de dimensionamento.

Nos anos 60, o desenvolvimento da Teoria dos Estados Limites Últimos (ELU) e a consequente redução dos fatores de segurança tornou inviável a hipótese de considerar a torção como um efeito secundário. A partir desse momento, a comunidade científica reage a esta problemática e mostra incentivo para a realização de estudos e determinação de cálculos específicos para a torção.

São poucos os casos devidamente documentados em que se manifestaram problemas associados a uma insuficiente resistência à torção. Em 1964 é registada uma rotura numa viga inserida na estrutura de um parque de estacionamento na Florida (USA) [17]. Sobre a face da viga, é evidenciado o desenvolvimento de uma fenda única com desenvolvimento helicoidal (rotura típica de torção), a qual foi justificada por uma insuficiente armadura de torção da viga. Outro caso registado, foi o aparecimento de uma fenda, com a mesma tipologia da anterior, numa viga que suportava uma pesada varanda em consola.



Fig.1.3 - Rotura frágil por torção de uma viga num edifício. [7]

Em 1958, foi criada a Comissão 438 do *American Concrete Institute* (ACI 438) com o objetivo de estudar o problema da torção e promover a sua investigação. Esta Comissão foi pioneira na elaboração de regras e recomendações para o dimensionamento de elementos sujeitos à torção. Outros países seguiram o exemplo, como é o caso da União Europeia, que criou a comissão V “Esforço transversal - Torção” pelo *Comité Européen du Béton* (CEB), e também da União Soviética e da Austrália.

Hoje em dia, o cálculo computacional e a modelação constituem ferramentas fundamentais para resolver problemas de arquitetura arrojada. Estas ferramentas proporcionam um cálculo mais realista do comportamento das estruturas. Este mesmo cálculo seria bastante demorado e penoso se realizado manualmente.

Apesar de já existir bastante investigação realizada sobre esta temática, a torção em vigas de betão estrutural continua a ser um tema atual. Para justificar esta afirmação, pode referir-se que as regras de dimensionamento e as verificações de elementos de betão armado à torção, incorporadas nas normas atuais, são ainda e em grande parte baseados em procedimentos semi-empíricos ou mesmo empíricos. Além disso, existem ainda alguns domínios no dimensionamento de vigas à torção onde o conhecimento científico ainda não conseguiu prever com suficiente certeza o comportamento estrutural, designadamente no que se refere ao comportamento pós-fissuração e à deformação inelástica na fase última comportamental

(ductilidade). Mais ainda, combinações de esforços, novos materiais e novas tecnologias de construção, são outros fatores determinantes no dimensionamento à torção que, em grande parte, ainda estão por explorar.

1.1.2 Casos de Torção em Estruturas de Betão

Para uma melhor compreensão desta temática, é necessário saber identificar e reconhecer a ação do momento torsor em estruturas correntes. Para isso, nesta secção, serão apresentados alguns exemplos que ilustram a ação do momento torsor.

A Fig.1.4 ilustra dois casos de palas que estão apoiadas numa viga de betão. Ambas as palas provocam cargas excêntricas às vigas e, conseqüentemente, criam grandes esforços de torção nas mesmas. A diferença está na continuidade das lajes. O facto da pala da Fig.1.4(b) possuir continuidade com a laje do pavimento adjacente, vai exercer um momento torsor de menor magnitude quando comparado com a pala isolada da Fig.1.4(a).

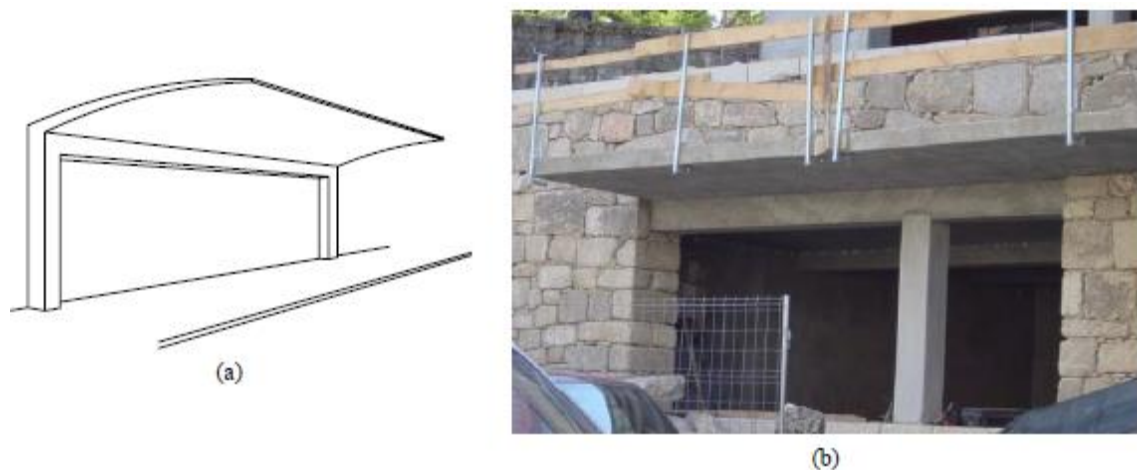


Fig.1.4 - Lajes de cobertura em consola: (a) isolada. (b) com continuidade. [7]

A Fig.1.5 ilustra casos de arquitetura moderna onde existe o prolongamento das lajes de pavimento para o exterior, funcionado como consolas. A Fig.1.5(a) mostra duas varandas de canto enquanto que a Fig.1.5(b) mostra varandas em balcão para canteiros de flores. Apesar da continuidade das varandas com a laje de pavimento adjacente, ambas as consolas originam elevados momentos torsores nas vigas de apoio.



Fig.1.5 - Edifícios com varandas: (a) de canto. (b) de balcão. [20, 7]

A Fig.1.6(a) ilustra uma ponte rodoviária no Japão. Esta ponte foi desenhada e concebida em espiral para compensar a elevada inclinação do terreno. A carga que os carros exercem no tabuleiro e o próprio peso da ponte originam, entre outros, esforços torsores elevados. A Fig.1.6(b) mostra, esquematicamente, o diagrama elástico dos momentos torsores quando um troço da ponte com desenvolvimento curvo é sujeito a uma carga distribuída.



Fig.1.6 - (a) Ponte rodoviária em espiral. (b) Esquema de um troço da ponte e respetivo diagrama T. [19, 7]

A Fig.1.7 ilustra casos de vigas do tipo “T” e “L”. Este tipo de vigas costumam ser utilizadas para suportar lajes e paredes através das suas abas. Ao suportar estes elementos, a viga é sujeita a carregamentos excêntricos que leva ao aparecimento de momentos torsores, entre outros esforços.

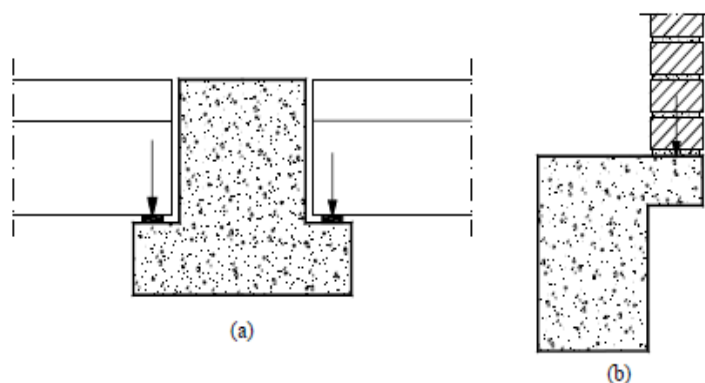


Fig.1.7 - Vigas do tipo: (a) “T”. (b) “L”. [7]

A Fig.1.8 ilustra esquematicamente uma laje inclinada de cobertura apoiada numa viga de bordadura. A força axial distribuída da laje é transmitida excentricamente à viga originando momentos torsores na mesma.

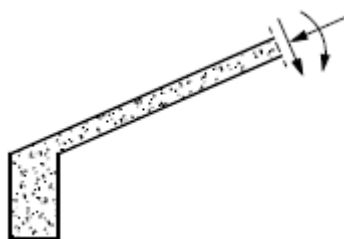


Fig.1.8 - Apoio de uma laje inclinada numa viga de extremidade. [7]

1.1.3 Tipos de Torção

Numa viga apoiada, a torção pode ser classificada de duas maneiras, dependendo do tipo de ligações que a viga possui e da forma como a secção absorve os efeitos torsionais. Segundo o tipo de ligações da viga, a torção pode ser classificada em: torção de compatibilidade e torção de equilíbrio.

Em pórticos correntes de edifícios podem surgir momentos torsores cuja ação pode ser considerada secundária em resultado das exigências de compatibilidade de deformação entre elementos. Se o elemento sujeito à torção não possuir suficiente resistência à torção, a estrutura poderá ganhar grandes deformações mas não entrará em rotura. A este tipo de torção dá-se o nome de *torção de compatibilidade*. A Fig.1.9(a) representa esquematicamente um caso de torção de compatibilidade. A viga que une os dois pórticos, quando sujeita a um carregamento vertical, vai fletir originando momentos torsores nas travessas dos pórticos. Estes momentos torsores (momentos hiperstáticos) têm origem na ligação monolítica entre as referidas travessas e a viga intermédia. São outros exemplos a Fig.1.4(b) e Fig.1.5(b).

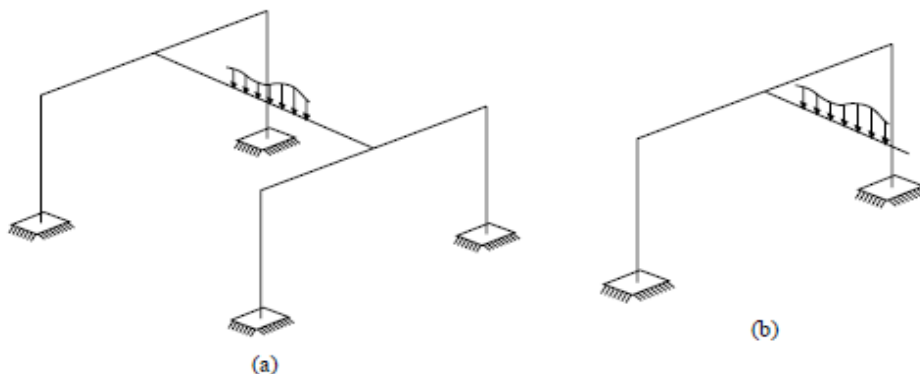


Fig.1.9 - Torção: (a) de compatibilidade. (b) de equilíbrio. [7]

A torção de compatibilidade pode ser desprezada no processo de dimensionamento, desde que seja prevista uma quantidade adequada de armadura de controlo de fissuração devidamente posicionada, para garantir a segurança de serviço do edifício (ELS). Tal é possível pois, quando a viga entra em Estado II (estado fissurado), a rigidez desta reduz drasticamente para 5 a 10% [18] da rigidez em Estado I (estado não fissurado). A Fig.1.10 comprova este fenómeno para várias vigas de secção retangular, com dimensões diferentes mas áreas iguais [12].

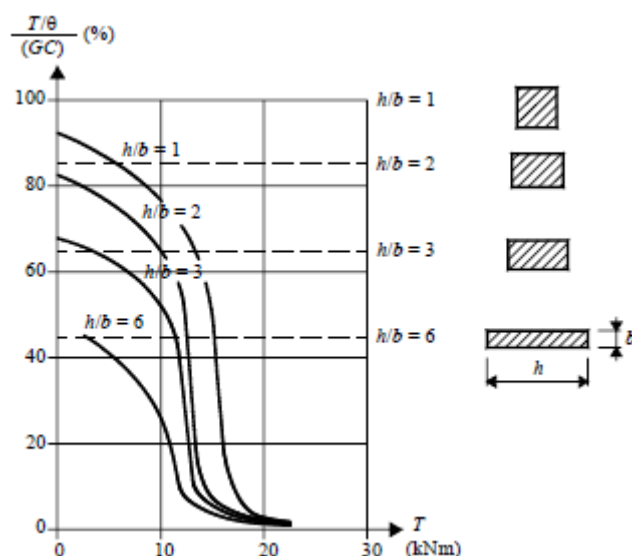


Fig.1.10 - Evolução da rigidez de torção com o momento torsor. [7]

Esta redução drástica na rigidez afetará a distribuição dos momentos hiperstáticos (fletores e torsores) numa estrutura estaticamente indeterminada. É assim possível simplificar o modelo elástico inicial (em Estado I) desprezando as ligações responsáveis pelos momentos torções e tornando mais fácil o procedimento de dimensionamento dos elementos estruturais. A Fig.1.11 ilustra dois modelos de cálculo para uma mesma laje de pavimento. O primeiro modelo remete ao um apoio de extremidade e o segundo modelo ao apoio de continuidade. A mola de rotação representa a rigidez de torção elástica das vigas de apoio. Se a rigidez da

mola for despregada, então as vigas de apoio não suportam momentos torsões em virtude da deformação da laje de pavimento.

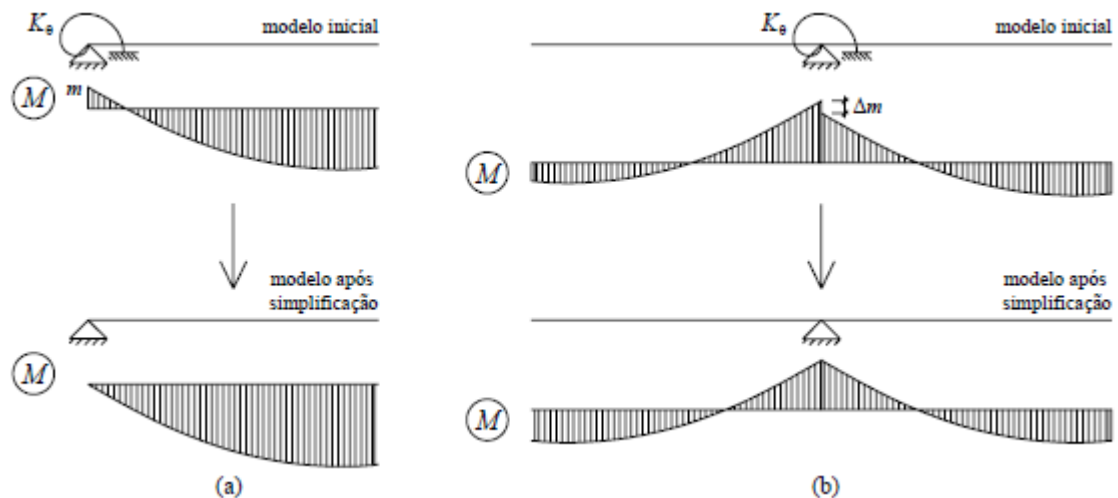


Fig.1.11 - Simplificação dos modelos de cálculo. (a) Apoio de extremidade da laje. (b) Apoio de continuidade da laje. [7]

O pórtico da Fig.1.9(b) possui uma viga em consola apoiada numa travessa. Quando carregada, a viga impõe um momento torsor na travessa e, se esta não possuir resistência suficiente para resistir ao esforço em questão, a estrutura colapsa. A este tipo de torção dá-se o nome de *torção de equilíbrio*. São exemplos de ocorrência de torção de equilíbrio os casos ilustrados na Fig.1.4(a), Fig.1.5(a), Fig.1.6(a), Fig.1.6(b), Fig.1.7(a), Fig.1.7(b) e Fig.1.8. A torção de equilíbrio não pode ser desprezada no dimensionamento, sendo sempre necessário verificar a segurança ao Estado Limite Último (ELU).

No que diz respeito à forma como a secção transversal das vigas absorve os efeitos torsionais, o momento torsor pode ainda ser classificado em: torção circulatoria e torção com empenamento.

A *torção circulatoria* ou *torção de St. Venant* ocorre em secções circulares e simétricas (cheias ou ocas). Este esforço é resistido essencialmente por um fluxo circulatorio de tensões tangenciais à secção.

A *torção com empenamento* ocorre em todo o tipo de secções não descritas anteriormente, em especial em secções abertas. Neste caso, o esforço não é distribuído de forma homogénea pela secção, proporcionando o surgimento de extensões e tensões axiais adicionais. Em geral, quando não existe restrição ao empenamento, os efeitos deste são inferiores ao efeito circulatorio. Contudo, em secções abertas de parede fina, o empenamento torna-se na componente principal de resistência à torção.

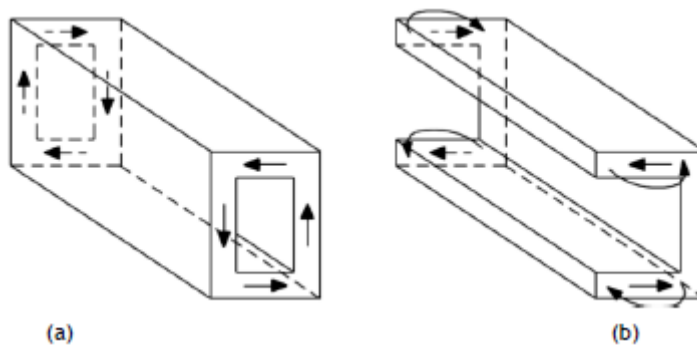


Fig.1.12 - Torção. (a) Circulatoria. (b) Com empenamento. [7]

Este trabalho focará o estudo em vigas à torção com secção retangular. Assim sendo, o estudo concentrar-se-á na torção circulatoria.

1.2 Conceitos Básicos para o Tema Investigado.

Comportamento Tipo de uma Viga de Betão Armado sujeita à Torção

Para compreender a mecânica comportamental de uma viga à torção, vários autores têm realizado inúmeros ensaios experimentais sujeitando, a este esforço, vigas de betão armado com diferentes variáveis de ensaio: tipo de secção, relação altura/largura da secção, tipos de betões, resistência do betão, classes de aço, taxa de armadura de torção, entre outras. A partir destes ensaios é possível traçar uma curva comportamental experimental que relaciona o momento torsor (T) imposto às vigas e à rotação transversal por unidade de comprimento (θ). Tal curva mostra como a viga se comporta ao longo de todo o historial de carregamento correspondente à imposição de um momento torsor com aumento gradual em termos de magnitude.

Para vigas de betão armado correntes, com taxas de armaduras moderadas, sujeitas à torção pura é possível desenhar uma Curva T - θ tipo tal como a representada na Fig.1.13. Na referida curva tipo é possível distinguir três zonas comportamentais distintas.

A primeira zona da Curva T - θ mostra um aumento gradual da deformação angular com o momento torsor. Esta fase corresponde à fase pré-fissuração (Estado I) onde as vigas se comportam de uma forma elástico-linear. É representada por uma reta com declive constante com origem no ponto de coordenadas (0;0) e final no ponto $(\theta_{cr}^I; T_{cr})$, onde T_{cr} representa o momento torsor de fissuração e θ_{cr}^I a rotação de torção correspondente a T_{cr} , por unidade de comprimento da viga. O declive representa a rigidez de St. Venant $((GC)^I)$. Nesta zona, as armaduras possuem pouca influência [4].

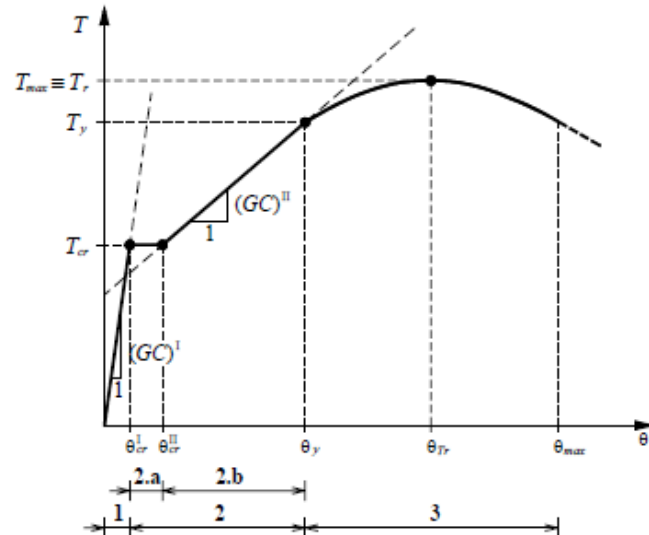


Fig.1.13 - Curva $T - \theta$ típica para uma curva de betão armado sujeita à torção pura. [28]

A segunda zona da Curva $T - \theta$ tem início com a fissuração das vigas e traduz-se por uma forte quebra de rigidez de torção. Esta quebra de rigidez é notória pela grande deformação angular que as vigas sofrem à medida que o momento torsor aumenta. Nesta zona há uma grande influência da taxa de armadura na rigidez de torção das vigas. Em geral, esta zona de comportamento da Curva $T - \theta$ pode ser aproximada a uma reta revelando um comportamento linear e parcialmente elástico, mas agora em regime fissurado (Estado II).

Contudo, é possível distinguir duas subzonas de comportamento. A Subzona 2.a da curva comportamental corresponde a um incremento brusco de rotação para um momento torsor constante e igual a T_{cr} . Para vigas com secção cheia, esta subzona traduz-se num patamar horizontal enquanto que para vigas com secção vazada, a Subzona 2.a pode não existir ou ser muito menos evidenciada. A Subzona 2.b corresponde ao desenvolvimento reto da Curva $T - \theta$, cujo declive representa a rigidez de torção pós-fissuração $((GC)^{II})$. A Subzona 2.a estabelece a ligação entre a Zona 1 e a Subzona 2.b.

A terceira e última zona da Curva $T - \theta$ é caracterizada por um comportamento não linear até as vigas atingirem o momento torsor máximo. Dependendo do tipo de rotura, é possível registar dois comportamentos distintos. Para uma rotura dúctil, a terceira zona comportamental inicia-se no instante em que pelo menos uma das armaduras de torção (longitudinal ou transversal) entra em cedência (caso ilustrado na Fig.1.13). Para uma rotura frágil, a terceira zona comportamental inicia-se no instante em que o betão comprimido nas escoras das vigas começa a entrar em regime não linear devido às tensões elevadas instaladas, podendo a rotura do betão à compressão nas escoras ocorrer antes da cedência das armaduras de torção (situação corrente em vigas com elevadas taxas de armadura de torção).

1.3 Objetivos e Justificação do Trabalho

É sabido que a ductilidade e a capacidade de rotação nas secções mais esforçadas de elementos estruturais constituem duas propriedades importantes na capacidade de redistribuição de esforços e na prevenção de um progressivo colapso estrutural.

A partir dos resultados experimentais realizado por Hsu [18] em 1968, com o objetivo de averiguar a influência do núcleo central de uma viga em betão armado na rigidez de torção pós-fissuração e na resistência à torção, é possível concluir que existe uma perda notória de ductilidade quando a secção da viga carece de um núcleo de betão, sendo a capacidade de sustentar a carga sob deformações inelásticas muito menor em vigas vazadas do que em vigas com secção cheia (e com geometria e quantidades de materiais semelhantes), para um momento torsor resistente idêntico.

Em 2003, Bernardo [7] também realizou ensaios com o objetivo de investigar a influência da resistência do betão à compressão e da taxa de armadura de torção na ductilidade e na capacidade de rotação plástica em torção para vigas de betão armado em caixão (secção vazada). O referido autor observou que tanto a ductilidade em torção como a capacidade de rotação plástica em torção diminuem com o aumento da resistência do betão, para taxas de armadura constante. O mesmo acontecia com o aumento da taxa de armadura, para classes de resistência de betão semelhantes. Contudo, o referido autor observou que era a taxa de armadura que apresentava maior influência na ductilidade e na capacidade de rotação em torção. Tendo por base os resultados obtidos, o referido autor apresentou intervalos de taxas de armaduras, em função da classe de resistência do betão, compatíveis com um comportamento dúctil das vigas ensaiadas à torção.

O trabalho anteriormente focado apenas incidiu sobre vigas em caixão, sendo que para vigas com secção cheia não foram encontrados, na literatura consultada, estudos vocacionados sobre a ductilidade em torção. Além disso, mesmo para vigas com secção vazada, não foram encontrados estudos adicionais sobre ductilidade em torção.

Conclui-se assim que continua a existir uma carência de estudos teóricos e experimentais especialmente focados para a ductilidade em torção de vigas de betão armado, assim como para a capacidade de rotação plástica em torção. Essa carência reflete-se nas disposições normativas sobre torção incorporadas na generalidade dos documentos normativos considerados mais abrangentes (Capítulo 3), onde, ao contrário do que acontece com a flexão, é notório o número reduzido de disposições específicas para a garantia de uma ductilidade mínima em torção. Tendo em conta o papel importante que a ductilidade em

torção assume em vigas de betão armado sujeitas a momentos torsores primários (Capítulo 2), um trabalho especificamente vocacionado para o estudo da ductilidade em torção de vigas de betão armado torna-se importante.

Com este trabalho pretende-se analisar o desempenho último à torção pura de vigas de betão armado com secção retangular, em particular a ductilidade em torção. A análise terá por base a definição de um parâmetro caracterizador dessa propriedade, designado por índice de ductilidade. As principais variáveis de estudo serão: a resistência do betão à compressão, a taxa total de armadura de torção, o desequilíbrio de armaduras (longitudinal *versus* transversal), o fator de escala da secção e o tipo de secção (secção cheia e vazada). Pretende-se avaliar a influência das variáveis enunciadas na ductilidade em torção de vigas de betão armado com secção retangular cheia ou vazada. Para tal, será constituída uma base de dados com resultados experimentais de ensaios de vigas à torção encontradas na literatura.

No final, pretende-se comparar os resultados obtidos com as disposições normativas de vários códigos internacionais e verificar adaptação das mesmas no comportamento último de vigas retangulares cheias e vazadas sujeitas à torção pura.

CAPÍTULO 2 - Ductilidade de Vigas de Betão Armado

2.1 Introdução

Em 1987, durante as grandes inundações que “varreram” a Suíça, a fundação de um pilar da Ponte de Wassen sofreu um assentamento muito acentuado, provocando um deslocamento vertical dessa fundação de 1,20 m e um deslocamento horizontal de 0,70 m [33]. Consequentemente, o tabuleiro da ponte acompanhou essas enormes deformações não previstas. Após a ocorrência, o tabuleiro foi encontrado num estado de plastificação pós-critica, mas sem a ocorrência de colapso (Fig.2.1). Este último facto permitiu repor gradualmente o tabuleiro na sua posição inicial e reparar toda a estrutura, permitindo de novo a sua abertura ao tráfego.



Fig.2.1 - Assentamento da fundação de um dos pilares da Ponte de Wassen na Suíça. [6]

O exemplo e caso real anterior mostra a capacidade de deformação que as estruturas de betão armado podem sofrer para solicitações de grande magnitude. Estas deformações são possíveis graças à ductilidade dos materiais e elementos estruturais componentes que permitem a adaptação das estruturas a redistribuições dos esforços internos, admitidas ou não no cálculo aos ELU, sem ocorrer uma rotura frágil e prematura. Este é o requisito da *Teoria da Plasticidade*. Dispondo corretamente as armaduras segundo adequadas regras de

pormenorização e em quantidade também adequada, uma estrutura em betão armado apresentará uma capacidade de deformação bastante grande.

A teoria da plasticidade faz hoje parte integrante da mecânica estrutural. Neste capítulo serão dadas algumas noções para a compreensão da teoria da plasticidade e feita uma relação entre a ductilidade de vigas em betão armado e a sua capacidade de rotação plástica. Primeiramente serão abordadas as vigas sujeitas à flexão e, posteriormente, as vigas sujeitas à torção. A necessidade de introduzir primeira a ductilidade em vigas à flexão, assunto este já bastante estudado, prendeu-se com o objetivo do seu enquadramento servir de base para a ductilidade de vigas à torção.

2.2 Ductilidade em Vigas sujeitas à Flexão

Em geral, a ductilidade define-se como a capacidade de um material, secção, elemento estrutural ou estrutura, estar sujeito a uma deformação plástica excessiva sem uma grande perda da sua resistência. Por outras palavras, a ductilidade é definida como a capacidade de sustentar deformações inelásticas sem um decréscimo substancial da capacidade de carga. Tal propriedade é um fator importante a ter em conta em projeto por estar diretamente relacionado com a segurança estrutural e a capacidade de redistribuição de esforços internos. (Bernardo, 2003 [7]).

Uma das vantagens dos elementos dúcteis é o aparecimento de sinais de incapacidade muito antes de ocorrer a rotura, como são exemplos as deformações excessivas, o aparecimento de fendas e o aumento gradual da largura das mesmas. Estes sinais permitem uma intervenção com reparação rápida das estruturas evitando assim algum acidente de grande escala. Como foi referido anteriormente, outra vantagem dos elementos dúcteis é a capacidade que estes têm de redistribuir cargas num processo lento e gradual, evitando assim a transmissão súbita de carga para outros elementos e, consequentemente, o seu colapso.

No processo de dimensionamento de vigas contínuas são tidas em conta várias hipóteses de carga para garantir a segurança ao ELU. Tendo em conta que o comportamento das estruturas não é linear e de acordo com os regulamentos e códigos, os esforços elásticos obtidos para cada hipótese de carga podem ser alterados. Estas alterações são feitas através de um coeficiente de redistribuição, δ , o qual deve ser sempre superior a um mínimo fixado (em geral $\delta \geq 0,75$). O objectivo deste limite é manter o diagrama de esforços próximo da distribuição elástica original garantindo assim o cumprimento das exigências em serviço (deformação e fissuração).

A redistribuição de esforços envolve a determinação de novos diagramas envolventes de esforços. Assim, se numa dada secção o valor do esforço for inferior ao obtido na análise elástica linear, será necessário calcular um novo diagrama em que o valor referido é fixado e os restantes esforços analisados, ao longo da estrutura, a fim de satisfazer o equilíbrio. A Fig.2.2 mostra um exemplo de uma viga reta contínua com dois tramos onde é aplicada esta técnica de redistribuição de esforços, considerando um coeficiente δ na secção de apoio central.

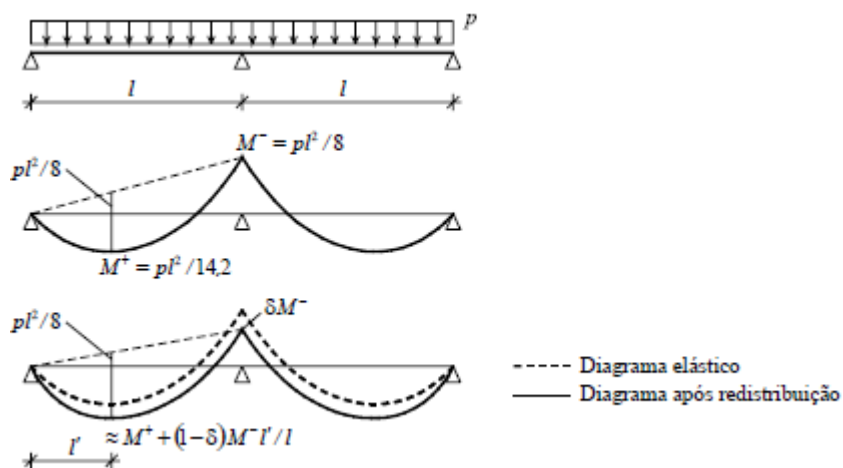


Fig.2.2 - Redistribuição do diagrama de momentos fletores elásticos em vigas contínuas. [7]

Caso a redistribuição de momentos seja súbita, em situação limite, dá-se a plastificação da armadura na secção sobre o apoio, formando assim a chamada rótula plástica. Se o momento elástico sobre o apoio é superior ao momento resistente, o momento negativo reduz-se e consequentemente, por equilíbrio, os momentos positivos aumentam. Se a secção sobre o apoio não tiver ductilidade suficiente, esta não consegue sustentar o momento resistente durante um intervalo de deformação apreciável, ocorrendo uma rotura efetiva da secção com o consequente anulamento do momento sobre o apoio. Nesta situação limite, os momentos positivos aumentam drasticamente dando origem a uma redistribuição total (Fig.2.3) e, nas secções onde os momentos positivos são máximos, é esgotada a capacidade resistente do material originando, assim, outras rótulas plásticas. A estrutura transforma-se num mecanismo (Fig.2.4).

O exposto anteriormente mostra que as rótulas plásticas permitem a utilização da capacidade total das demais secções transversais de um elemento sujeito à flexão para cargas últimas, uma vez que as redistribuições de esforços resultantes encaminham os esforços internos para outras secções. Se as secções de momentos máximas possuírem ductilidade suficiente, a redistribuição de esforços resultante ocorrerá de forma gradual ao longo do tempo, evidenciando a estrutura sinais de incapacidade antes da rotura efetiva.

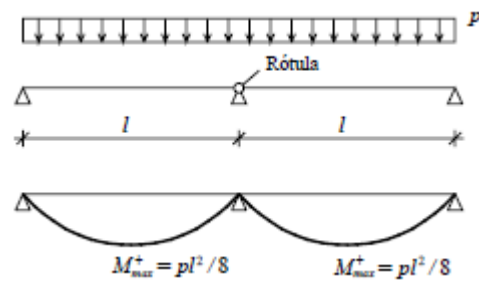


Fig.2.3 - Redistribuição total do diagrama de momentos fletores elásticos. [7]

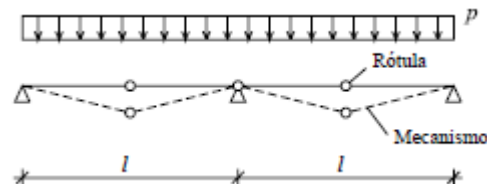


Fig.2.4 - Mecanismo resultante da redistribuição total do diagrama de momentos fletores elásticos. [7]

Verifica-se assim que a redistribuição de momentos é dependente de uma adequada ductilidade nas regiões de momento máximos, onde é propícia a formação de rótulas plásticas. A utilização da conhecida metodologia “alternância de sobrecargas”, em que os momentos negativos são determinados para um arranjo de carga e os momentos positivos para outro, permite garantir uma reserva de capacidade resistente em cada secção do elemento estrutural que não é utilizada em simultâneo por qualquer condição de carga.

Foi já largamente demonstrado que a ductilidade em flexão das vigas depende diretamente da capacidade de rotação plástica das secções mais esforçadas, sendo esta conseguida fundamentalmente pela:

- escolha de um aço com características de ductilidade adequadas;
- conceção das secções de modo a que a posição da linha neutra na rotura, definida pelo parâmetro x/d (sendo x a profundidade da linha neutra e d a altura útil da secção), seja pequena;
- adoção de armaduras transversais com pequeno espaçamento que garantam um confinamento adequado do betão comprimido, o que permite aumentar consideravelmente a capacidade de rotação (através do aumento da capacidade de deformação última do betão à compressão) e evitar uma rotura frágil por esforço transversal.

Para assegurar uma boa ductilidade numa viga sujeita à flexão é ainda necessário cumprir as regras de pormenorização preconizadas pelos documentos normativos, garantindo assim, em simultâneo, a segurança dos Estados Limites Últimos e de Serviço.

Limitar a armadura longitudinal de tração dentro de um intervalo adequado constitui uma das regras que, em geral, se encontra prescrita nos documentos normativos. A adoção de uma armadura mínima ajuda a prevenir uma rotura frágil e prematura quando o betão tracionado fissa. O objetivo é a armadura de tração resistir, ao incremento súbito de tensão resultante da fissuração do betão, sem entrar em cedência. A taxa de armadura mínima é calculada a partir do princípio de equivalência que estabelece que a força no betão não fissurado (com uma determinada resistência à tração f_{ct}) iguale a força na armadura com uma tensão igual ou inferior à sua tensão de cedência: $\sigma_s \leq f_y$. Quanto à adoção de uma armadura máxima, esta também ajuda a prevenir uma rotura frágil, mas neste caso por esmagamento do betão comprimido. Numa secção com muita armadura de tração, a linha neutra tende a afastar-se da fibra mais comprimida do betão, podendo levar à rotura do betão muito antes da cedência das armaduras tracionadas.

Para além da limitação direta da quantidade de armadura de tração, os documentos normativos também incorporam medidas mais diretas para controlar a ductilidade, como sejam a limitação da profundidade do eixo neutro da rotura, o controlo das extensões nos materiais (aço e betão) na rotura e, para o cálculo plástico, o cálculo e verificação da capacidade de rotação plástica das secções críticas.

2.3 Ductilidade em Vigas sujeitas à Torção

Quando se fala de torção, é necessário ter em atenção que o fenómeno principal neste esforço é o corte. É sabido que os elementos de betão armado sujeitos predominantemente ao corte sofrem uma rotura tendencialmente frágil. No entanto, se as vigas de betão armado possuírem uma adequada armadura longitudinal e transversal, a rotura por corte não será tão frágil como seria de esperar. A influência da fissuração diagonal no comportamento do betão comprimido é essencial para a dissipação da energia interna através de uma razoável deformação (fenómeno designado por *softenning effect* ou amolecimento do betão), tornando assim a rotura mais dúctil [7]. Contudo, a teoria da plasticidade nem sempre é aplicável no caso de vigas onde o corte constitui um esforço primário.

Como referido na secção anterior, a ductilidade dos elementos estruturais é importante para a redistribuição lenta e gradual dos esforços internos, de forma a evitar o seu colapso súbito. Para o caso particular, mas corrente, de vigas contínuas com desenvolvimento curvo em planta, os esforços de torção de equilíbrio são primordiais para a sua estabilidade, apesar da real combinação com outros esforços. A Fig.2.5 ilustra a interação de esforços presente num troço de viga curva com comprimento ds . O vetor soma dos momentos M e $M + dM$ é tangente ao eixo longitudinal do elemento podendo ser visto como um momento torsor $m = M/r$. As

equações de equilíbrio tornam clara a dependência entre o momento torsor e os outros esforços. Este facto vai-se refletir na redistribuição de esforços.

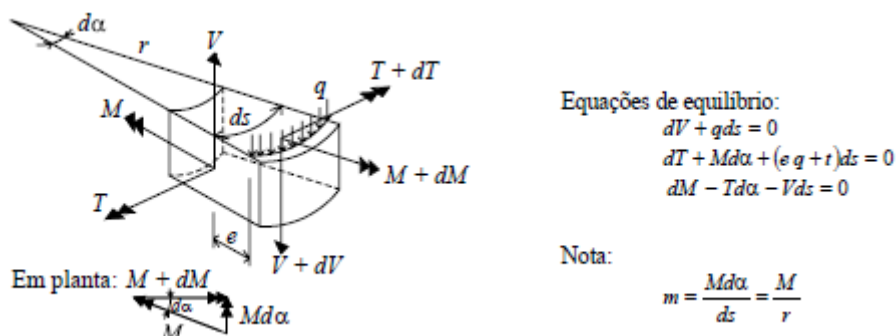


Fig.2.5 - Equilíbrio de uma fatia elementar de uma viga curva. [7]

A Fig.2.6 ilustra dois casos esquemáticos de vigas contínuas de dois tramos com eixo curvo e sujeitas a uma carga uniformemente distribuídas sem excentricidade em relação ao eixo. A diferença entre os dois casos está no apoio central. Na Fig.2.6(a) a viga não se encontra restringida à torção no apoio central, pelo que a rotação transversal é livre nessa secção, enquanto que na Fig.2.6(b) todos os apoios da viga restringem a rotação de torção.

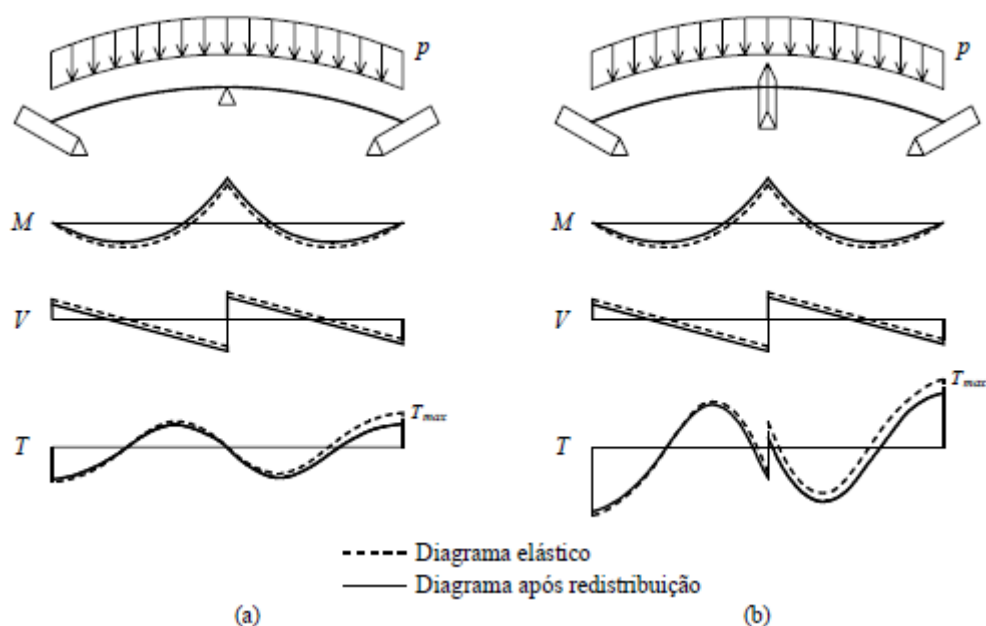


Fig.2.6 - Redistribuição do diagrama dos momentos torsores elásticos em vigas contínuas com eixo curvo. (a) Rotação transversal livre no apoio central. (b) Rotação transversal restringida no apoio central. [7]

Como é possível observar na Fig.2.6, nos apoios de extremidade as armaduras são dimensionadas para o esforço máximo predominante - a torção (com $M = 0$ e V moderado).

Quando o momento torsor ultrapassa o momento resistente da secção, a viga irá sofrer grandes deformações angulares nos apoios de extremidade acompanhadas de uma

redistribuição dos esforços elásticos (torsor, fletor e transverso) ao longo da viga. Contudo, é no diagrama de momentos torsor que se observam grandes alterações na sua redistribuição.

Tal como no caso da flexão, se os apoios de extremidade não possuírem ductilidade suficiente para resistir a ações imprevistas, a redistribuição será feita de uma forma brusca, plastificando a zona referida e originando, assim, uma *rótula de torção*. O resultado limite será a anulação do momento torsor nos apoios de extremidade (devido à rotura por torção) o qual originará o afastamento do diagrama de momentos torsor em relação ao diagrama elástico. Contudo, o mesmo não é observado nos diagramas de momentos fletores e de esforço transverso, que sofrem pequenas alterações (Fig.2.7).

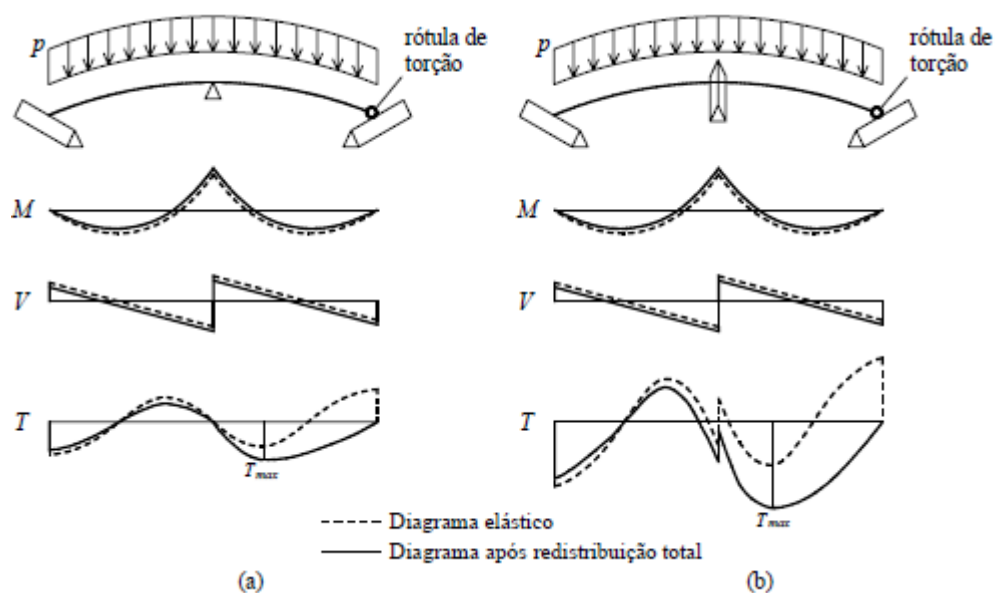


Fig.2.7 - Redistribuição total do diagrama dos momentos torsores. [7]

Com esta nova redistribuição, um novo momento torsor máximo (com um fator de incremento que pode chegar a ser próximo de 2 para o caso ilustrado na Fig.2.7(b)) surge numa secção não preparada para lhe resistir, podendo assim esgotar a sua capacidade de resistência e surgir uma nova rótula. A estrutura passa a ser um mecanismo podendo levar ao seu colapso (Fig.2.8). Posto o anterior, e tal como no caso da flexão, verifica-se que a redistribuição de momentos é dependente de uma adequada ductilidade nas regiões de momento de torsão máximos, onde são propícias a formação de rótulas plásticas.

Refere-se que toda a análise anterior foi desenvolvida com o auxílio de um programa de cálculo automático (TRICALC).

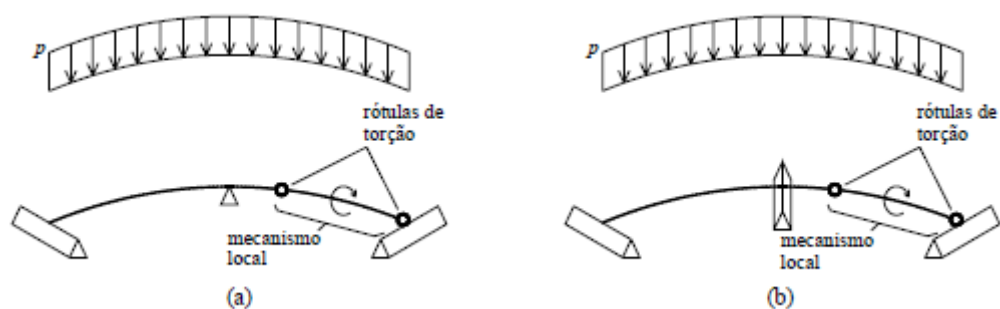


Fig.2.8 - Mecanismo de torção resultante da redistribuição total do diagrama dos momentos torsores.

[7]

A análise anterior só é válida se se admitir que uma rótula de torção possui um carácter local, isto é, que se desenvolve ao longo de um pequeno comprimento da viga na zona crítica. Apesar de constituir uma hipótese pouco razoável, dado que o mecanismo resistente ao momento torsor de uma viga de betão armado ter um carácter tridimensional, a verdade é que em 2003, Bernardo [7] demonstrou, por via experimental, que em regime plástico, é possível formar-se um mecanismo local para a rótula por torção. O referido autor observou que, em viga com secção quadrada e vazada, o comprimento da zona de armaduras plastificadas (rótula plástica de torção) é aproximadamente igual à dimensão exterior da secção transversal. Assim sendo, pode considerar-se que a análise anteriormente apresentada tem validade.

Deve também ser referido que toda a análise já efetuada é válida assumindo diagramas elásticos para os esforços (procedimento geralmente empregue na prática de projeto). No entanto, é geralmente com as secções críticas no Estado II (fissurado) que a estrutura real funciona.

A Fig.1.11 do Capítulo 1 ilustra a problemática que as fissuras podem trazer à resistência do momento torsor. Quando fissurada, a secção pode perder cerca de 90 a 95% da sua capacidade resistente. Em estruturas estaticamente indeterminadas, como é o caso de vigas contínuas de eixo curvo, a quebra de rigidez de torção obriga a que ocorra uma redistribuição de esforços elásticos. Em 1978, Hsu *et al.* [16] constataram que a análise dos esforços deveria ser feita assumindo a secção fissurada nas regiões onde o momento torsor é máximo. Contudo, esta análise no Estado II só é válida para os diagramas de momentos fletores que serão responsáveis pela redistribuição de esforço quando a rigidez de torsão for nula. Por sua vez, os diagramas de momentos torsores devem ser analisados em Estado I devido à sua importância para o equilíbrio da estrutura.

A Fig.2.9 ilustra o caso real de um colapso de uma ponte rodoviária com diretriz curva em Northridge, USA [30]. Este colapso derivou de um sismo de elevada magnitude que levou a um aumento considerável dos esforços internos, em especial os esforços de torção junto dos

apoios de continuidade (que não permitiam a rotação transversal). Fica claro que, para este tipo de estruturas, os efeitos de torção não podem ser desprezados quando se pretende dotá-las de uma ductilidade adequada.



Fig.2.9 - Colapso estrutural de uma ponte rodoviária com eixo curvo. [7]

Outras ações negativas e não previstas para estruturas deste tipo são os assentamentos de apoio. Tal como no caso da Ponte de Wassen (Fig.2.1), os assentamentos de apoio não previstos podem também incrementar os esforços de torção nas zonas críticas de vigas contínuas de eixo curvo, levando à plastificação das armaduras nas regiões críticas.

À semelhança da flexão, a ductilidade em torção é controlada pelos mesmos parâmetros enunciados na Secção 2.2 (com exceção da profundidade da linha neutra, não aplicável neste caso). Em geral, os documentos normativos preconizam a limitação da quantidade de armadura de torção e o controlo da tensão de compressão do betão nas escoras. Os objetivos destas limitações são os mesmos dos descritos na Secção 2.2.

2.4. Ductilidade e Capacidade de Rotação em Torção de Vigas de Betão Armado com Secção Cheia e Vazada

Em 1968, Hsu [18] apresentou resultados de ensaios experimentais com o objetivo de perceber a influência do núcleo central de uma viga em betão armado na rigidez de torção pós-fissuração. Os referidos ensaios consistiram em sujeitar três vigas idênticas (em termos de dimensões exteriores para a secção, materiais e taxas de armaduras de torção) à torsão pura, até à sua rutura. A diferença residia na espessura da parede da secção. A Viga B4 possuía uma secção cheia ($h/x = 0,5$, sendo h a espessura da parede e x a dimensão menor da secção), a Viga D4 uma secção vazada com $h/x = 0,25$ e a Viga E4 também uma secção vazada

com $h/x = 0,15$. Os resultados obtidos são apresentados na forma de gráficos que relacionam o momento torsor (T) “versus” rotação de torção (θ) e estão ilustrados na Fig.2.10.

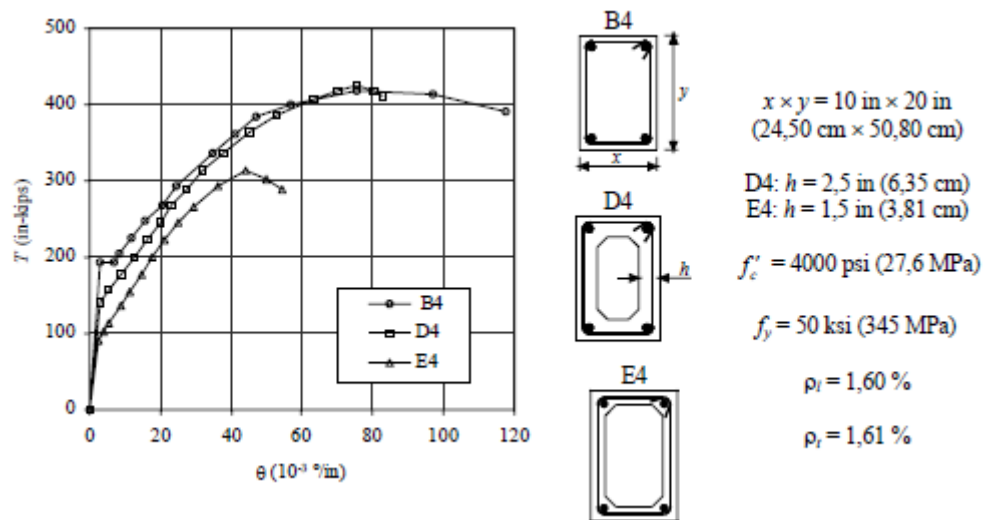


Fig.2.10 - Influência da espessura da parede no comportamento à torção pura. [7]

Da observação do gráfico de resultados ressalta que todas as vigas apresentam, em maior ou menor grau, um comportamento dúctil na rotura. No entanto, é notória a perda de ductilidade quando a secção da viga carece de núcleo de betão. A capacidade de sustentar a carga sob deformações inelásticas é muito menor em vigas vazadas do que em vigas com secção cheia, para um momento torsor resistente idêntico (vigas B4 e D4). A viga E4 mostra uma menor capacidade resistente. Uma possível justificação para esta observação poderá estar relacionada com problemas de encurvadura das paredes devido à sua pequena espessura.

Em 2003, Bernardo [7] procurou estudar a influência da resistência do betão à compressão e da taxa de armadura de torção na ductilidade e na capacidade de rotação plástica em torção para vigas de betão armado em caixão. Para tal, o referido autor sujeitou uma série de 11 vigas em caixão de betão armado à torção pura, até à rotura. Tais vigas foram agrupadas em três grupos distintos em função da resistência do betão (entre 40 e 100 MPa). O primeiro grupo era constituído por cinco vigas em betão de resistência “normal”, o segundo por cinco vigas de betão de alta resistência e o terceiro por seis vigas igualmente de betão de alta resistência mas com classe de resistência superior ao grupo anterior. Em cada grupo de vigas, a taxa de armadura total de torção variava em vigas ao longo de um amplo intervalo (entre 0.3 % e 2.7 %).

Dependendo da variável em estudo, as vigas ainda foram agrupadas em várias séries com características semelhantes. Para o estudo da influência da resistência do betão à compressão (f'_c), as vigas foram agrupadas em função das taxas de armadura de torção. Cada série possuía

vigas com taxas de armadura iguais ou semelhantes e era caracterizada por um valor médio de taxa de armadura de torção ($\rho_{tot,m}$). De forma análoga à variável anteriormente referida, para o estudo da influência da taxa total de armadura (ρ_{tot}), as vigas foram agrupadas em função da resistência do betão. Cada série possuía vigas com valores iguais ou semelhantes de resistência à compressão do betão e era caracterizada por um valor médio de resistência do betão (f_{cm}).

No que diz respeito à ductilidade das vigas ensaiadas, Bernardo definiu e quantificou um índice de ductilidade em torção, tendo observado que para taxas semelhantes de armadura a ductilidade das vigas diminuía linearmente com o aumento da resistência do betão (Fig.2.11). Para betões de classe semelhantes de resistência, o referido autor observou que a ductilidade em torção também diminuía bastante e de forma linear com o aumento da taxa de armadura. Independentemente da classe de betão considerado, o limite superior da taxa de armadura observado para garantir ductilidade em torção foi cerca de 1,30%, a partir do qual o índice de ductilidade (μ_θ) tende para um valor unitário correspondente a vigas sem ductilidade (Fig.2.12).

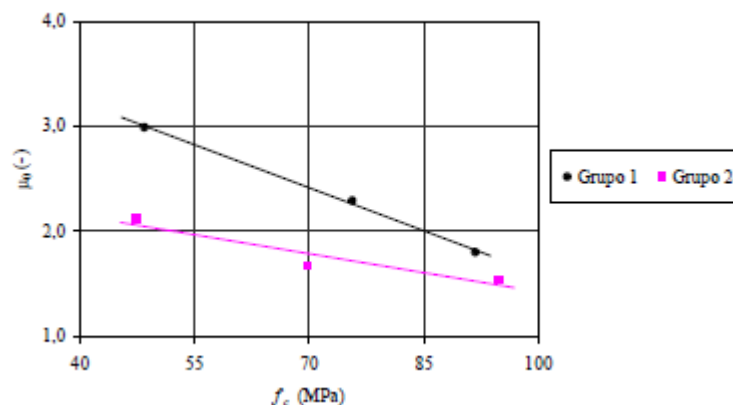


Fig.2.11 - Influencia da resistência do betão na ductilidade em torção. [7]
(Grupo 1: $\rho_{tot,m} = 0,35\%$; Grupo 2: $\rho_{tot,m} = 0,77\%$)

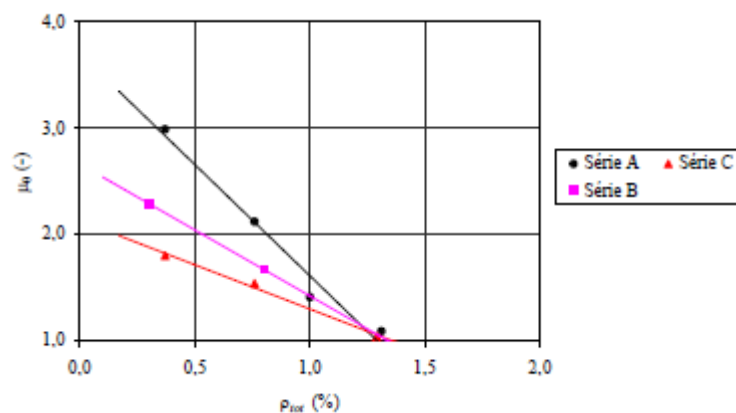


Fig.2.12 - Influencia da taxa de armadura na ductilidade em torção. [7]
(Série A: $f_{cm} = 49,2$ MPa, Série B: $f_{cm} = 72,4$ MPa, Série C: $f_{cm} = 92,7$ MPa)

Quanto à capacidade de rotação plástica em torção, e tendo por base a definição de um parâmetro de tendência plástica (*PTP*) caracterizador do comportamento puramente plástico à torção das vigas ensaiadas, Bernardo observou que para uma taxa de armadura de torção aproximadamente constante, a capacidade de rotação plástica diminui ligeiramente e de forma linear com o aumento da resistência do betão (Fig.2.13). Para betões de classe resistente semelhantes, a capacidade de rotação plástica também diminui com o aumento da taxa de armadura (Fig.2.14). À semelhança da ductilidade, o autor observou que o limite superior da taxa de armadura para garantir uma capacidade de rotação plástica em torção corresponde a uma taxa de armadura de cerca de 1,30%, independentemente da classe de resistência do betão considerado.

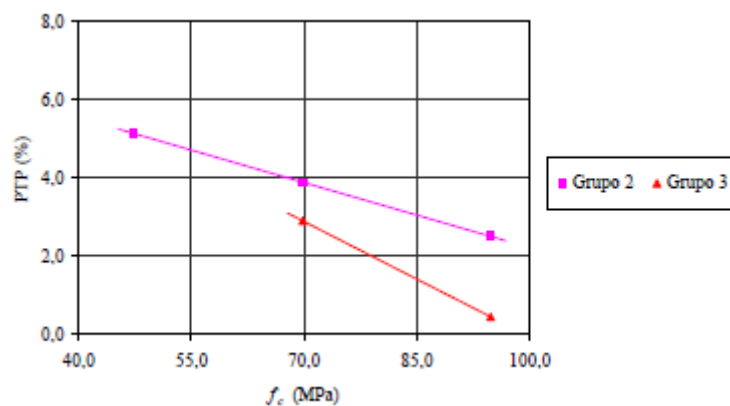


Fig.2.13 - Influencia da resistência do betão na capacidade de rotação plástica em torção. [7]

(Grupo 2: $\rho_{tot,m} = 0,77\%$; Grupo 3: $\rho_{tot,m} = 1,30\%$)

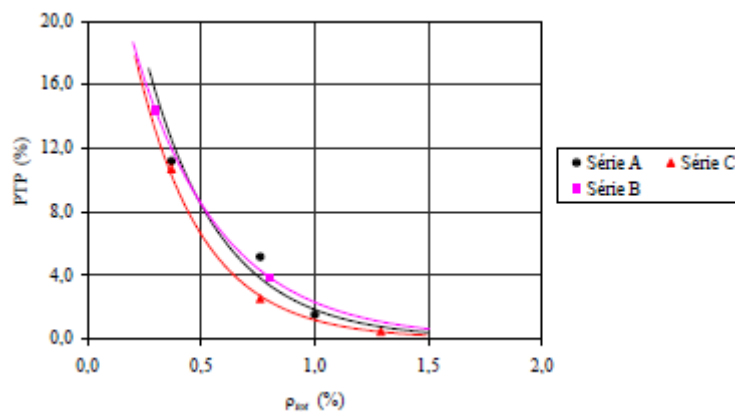


Fig.2.14 - Influencia da taxa de armadura na capacidade de rotação plástica em torção. [7]

(Série A: $f_{cm} = 49,2$ MPa, Série B: $f_{cm} = 72,4$ MPa, Série C: $f_{cm} = 92,7$ MPa)

2.5 Notas Finais

Neste capítulo foram apresentadas algumas noções e situações para a compreensão da importância do comportamento dúctil de uma viga sujeita à torção. Foi igualmente apresentada a relação que existe entre a ductilidade de vigas em betão armado e a sua capacidade de rotação plástica nas regiões críticas.

Mostrou-se que, à semelhança do momento fletor, o momento torsor de equilíbrio pode assumir um papel importante na redistribuição dos esforços elásticos. A redistribuição lenta e gradual dos esforços internos, que permite evitar uma situação de colapso súbito, é fortemente dependente de uma adequada ductilidade nas regiões de momento torsor máximo, onde existe uma propensão para a formação de rótulas plásticas. O caso da ponte rodoviária com diretriz curva em Northridge nos EUA constitui um bom exemplo de como é importante estudar a ductilidade em torção neste tipo de estruturas.

Ensaio anteriores mostraram que as vigas de betão armado, se corretamente dimensionadas e armadas, evidenciam algum comportamento dúctil na rotura, com a formação de rótulas de torção. Tais ensaios revelaram, ainda, que em vigas de secção retangular vazada, a classe de resistência do betão e a taxa de armadura de torção influenciam bastante a ductilidade e a capacidade de rotação em torção.

Tanto a ductilidade como a capacidade de rotação plástica em torção diminuem com o aumento da resistência do betão, para taxas de armadura constante. Contudo, a influência da resistência do betão não é muito grande dado que as diferenças de evolução, tanto no índice de ductilidade como no parâmetro de tendência plástica, são pequenas para grandes variações de resistência de betão.

No que diz respeito à influência da taxa de armadura, esta constitui o parâmetro mais influente comparativamente à resistência do betão, tanto na ductilidade como na capacidade de rotação plástica em torção. Ambas as propriedades diminuem com o aumento da taxa de armadura, para classes de resistência de betão semelhantes. O limite superior de taxa de armadura para garantir a ductilidade e a capacidade de rotação plástica em torção é invariável e corresponde a uma taxa de armadura de cerca 1,30% para vigas com secções vazadas.

Do exposto anteriormente, é de notar que existe uma grande escassez de estudos focados para a ductilidade em torção de vigas de betão armado, assim como para a capacidade de rotação plástica em torção, propriedade esta diretamente relacionada com a ductilidade. Os

principais resultados apresentados no presente capítulo apenas focam vigas com secção vazada. Para vigas com secção cheia não foram encontrados, na literatura científica, estudos vocacionados para o estudo da ductilidade em torção. É por isso assaz importante que sejam realizados mais estudos sobre esta temática, de modo a sustentar a inclusão, num futuro próximo, de cláusulas específicas para a garantia de ductilidade em torção nos documentos normativos, à semelhança do que já acontece para o caso da flexão.

CAPÍTULO 3 - Disposições Normativa

3.1. Introdução

Neste capítulo pretende-se resumir e analisar as disposições de documentos internacionais com carácter regulamentar e normativo e de interesse para o tema em estudo. Serão analisadas as disposições referentes a vigas em betão armado submetidas apenas à torção pura (torção de equilíbrio) e com secções retangulares cheias ou vazadas. Das disposições a analisar serão focadas as disposições relacionadas com a resistência à torção e que garantam, de forma direta ou indireta, um adequado comportamento das vigas à torção. Para este último, incluem-se disposições relacionadas com a limitação da quantidade de armadura e da tensão de compressão do betão, bem como disposições construtivas gerais. As disposições construtivas serão particularmente úteis para ajudar a construir a base de dados relativa às vigas ensaiadas à torção.

Os códigos e regulamentos analisados neste capítulo serão os seguintes: códigos americanos ACI 318R-89 [1] e ACI 318R-11 [2], códigos europeus MC90 [9], MC10 [10] e EC2 de 2010 [11] e o código canadiano CSA A23.3-04 [14]. Tais documentos são considerados importantes pela sua abrangência territorial. As disposições de torção das duas versões referidas para o código americano baseiam-se em modelos diferentes. O código ACI 318R-89 [1] baseia-se no modelo de flexão enviesada, já o código ACI 318R-11 [2] baseia-se na analogia da treliça espacial. O primeiro documento incorpora disposições relativas à limitação da quantidade de armadura de torção que entretanto foram parcialmente omitidas no segundo documento. Como tais disposições têm especial interesse para o presente trabalho, considerou-se importante incorporar o ACI 318R-89 [1] neste capítulo.

3.2. Código Americano, ACI 318R-89 [1]

3.2.1. Disposições Gerais

Na Cláusula 11.6.1, o código em estudo estabelece que os efeitos da torção devem ser incluídos na análise, em conjunto com os efeitos dos outros esforços (transverso e flexão) caso o momento torsor reduzido T_u seja maior que $\phi(0,5\sqrt{f'_c} \sum x^2 y)$, onde ϕ é o fator de redução da resistência, f'_c a resistência à compressão do betão e x e y a menor e a maior dimensão, respetivamente, da secção. Caso seja menor, os efeitos da torção podem ser desprezados.

Na Cláusula 11.6.2, o código obriga que elementos que dependem do momento torsor reduzido T_u , para o seu equilíbrio estático, sejam dimensionados à torção.

Na Cláusula 11.6.3, o código especifica que, para estruturas estaticamente indeterminadas, se o momento torsor é reduzido após a redistribuição de esforços internos então o momento torsor máximo T_u também pode ser reduzido para $\phi(4\sqrt{f'_c} \sum x^2 y/3)$. Quando o momento torsor reduzido se encontra entre $\phi(0,5\sqrt{f'_c} \sum x^2 y)$ e $\phi(4\sqrt{f'_c} \sum x^2 y/3)$, a armadura de torção pode ser dimensionada utilizando os momentos torsos reais calculados. É de notar que a presente cláusula aplica-se a estruturas porticadas típicas e regulares.

3.2.2. Verificação da Segurança à Torção

A Cláusula 11.6.5 determina que o dimensionamento de secções transversais à torção deve verificar a seguinte condição de segurança:

$$T_u \leq \phi T_n \quad (3.1)$$

em que:

T_u = momento torsor reduzido na secção em causa;

ϕ = fator de redução de resistência;

T_n = valor nominal do momento torsor resistente.

O valor nominal do momento torsor resistente T_n pode ser calculado através de:

$$T_n = T_c + T_s \quad (3.2)$$

em que:

T_c = valor nominal do momento torsor resistente conferido pelo betão;

T_s = valor nominal do momento torsor resistente conferido pela armadura de torção.

3.2.3. Valor Nominal do Momento Torsor Resistente

3.2.3.1. Secções Retangulares Cheias

A Cláusula 11.6.6.1 especifica que, para o caso da torção pura numa secção retangular, o momento torsor resistente conferido pelo betão, T_c , deve ser calculado por:

$$T_c = 0,8\sqrt{f'_c} x^2 y \quad (3.3)$$

A Cláusula 11.6.9.1 estabelece que a armadura de torção deve ser prevista por forma a satisfazer as Eqs. 3.1 e 3.2 quando o momento torsor reduzido T_u excede o momento torsor resistente T_c . O momento torsor resistente T_s deve ser calculado da seguinte forma:

$$T_s = \frac{A_t \alpha_t x_1 y_1 f_y}{s} \quad (3.4)$$

em que:

A_t = área de um ramo da armadura transversal (cinta);

α_t = coeficiente de eficiência. Este coeficiente é calculado por:

$$\alpha_t = 0,66 + 0,33(y_1/x_1) \leq 1,5;$$

x_1 = menor distância entre eixos dos ramos das cintas transversais;

y_1 = maior distância entre eixos dos ramos das cintas transversais;

f_y = tensão de cedência da armadura;

s = espaçamento longitudinal entre cintas.

A área da armadura transversal, A_t , necessária para resistir à torção é calculada pela seguinte equação:

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_u - \phi T_c}{\phi f_y \alpha_t x_1 y_1} \quad (3.5)$$

A Cláusula 11.6.9.3 estabelece que, para o caso da torção pura, a área de armadura longitudinal, A_l , é constituída por varões distribuídos ao longo do perímetro de uma cinta com área A_t , e deve ser calculada do seguinte modo:

$$A_l = 2A_t \left(\frac{x_1 + y_1}{s} \right) \quad (3.6)$$

A Eq.3.6 requer uma igualdade de volumes entre as armaduras de torção (transversal e longitudinal), a menos que seja necessária uma maior quantidade de armadura longitudinal para satisfazer a condição de armadura mínima.

Resumindo, a equação fundamental para a resistência à torção de elementos de betão armado fica da seguinte forma:

$$T_n = \underbrace{\frac{x^2 y}{3} (2,4 \sqrt{f'_c})}_{T_c} + \underbrace{\alpha_t \frac{x_1 y_1 A_t f_y}{s}}_{T_s} \quad (3.7)$$

É de reparar que a componente T_c na Eq.3.7 é idêntica à Eq.3.3, uma vez que $2,4/3 = 0,8$.

3.2.3.2. Secções Retangulares Ocas (Secções em Caixão)

Para efeitos de dimensionamento, a Cláusula 11.6.1.2 estipula que uma secção retangular em caixão pode ser considerada de três formas. Se a espessura da parede transversal h for igual ou superior a $x/4$, então é possível considerar uma secção cheia equivalente e o disposto na Secção 3.2.3.1 é aplicável nesta situação. Se a espessura da parede transversal estiver entre o intervalo $x/10$ e $x/4$, então é possível considerar uma secção cheia equivalente desde que $\sum x^2y$ seja multiplicado por $4h/x$. Se a espessura da parede transversal for inferior a $x/10$ então é necessário contabilizar a rigidez da parede nos cálculos. É de notar que as vigas em caixão de parede fina têm também uma tendência maior de entrar em rotura de uma forma frágil do que as vigas com secção cheia que possuem uma rotura mais dúctil. Assim, a espessura limite da parede para prevenir uma flexibilidade excessiva e possível encurvadura da parede é igual a $x/10$.

O código especifica ainda que as secções em caixão em que a armadura longitudinal de torção é constituída por menos de 8 varões distribuídos ao longo do perímetro da secção, devem possuir em cada canto inferior um chanfro com um lado mínimo de $x/6$. Caso a secção seja constituída por 8 ou mais varões distribuídos ao longo do perímetro da secção, os chanfros devem possuir um lado mínimo de $x/12$, mas não necessariamente maior que $4in (10,2cm)$.

Em resumo, vigas em caixão com uma espessura de parede $h \geq x/4$ são equivalentes a vigas de secção cheia com as mesmas dimensões externas e as suas resistências à torção são determinadas através da Eq.3.7. Caso a espessura seja $h < x/4$, o momento torsor último é inferior ao de uma secção cheia e por isso deve ser afetado por um fator de redução igual a $4h/x$ (aplicado ao termo T_c). Assim, adotando a Eq.3.7 ao caso das vigas em caixão, T_n é calculado do seguinte modo:

$$T_n = \underbrace{\left(\frac{4h}{x}\right) \frac{x^2y}{3} (2,4\sqrt{f'_c})}_{T_c} + \underbrace{\alpha_t \frac{x_1y_1A_t f_y}{s}}_{T_s} \quad (3.8)$$

em que $x/10 \leq h \leq x/4$.

3.2.4. Exigências para a Armadura de Torção

3.2.4.1. Constituição da Armadura de Torção

A Cláusula 11.6.7.3 define a constituição de uma armadura de torção. Esta deve ser constituída por dois tipos de armaduras combinadas: transversal e longitudinal. A armadura transversal é constituída por estribos fechados (cintas) ou por armadura em espiral. Os estribos devem ser fechados dado que as fissuras de torção podem aparecer em todas as faces

do elemento. Quanto à armadura longitudinal, esta é constituída por varões distribuídos ao longo do perímetro da secção conferindo um melhor controlo da fissuração. Ambas as armaduras são indispensáveis para garantir a resistência das vigas à torção.

3.2.4.2. Armadura Mínima de Torção

A Cláusula 11.6.9.2 estipula que a área mínima de estribos fechados (cintas) deve ser calculada segundo a Cláusula 11.5.5.5. Adotando a cláusula à torção pura, o limite inferior da armadura transversal de torção é definido pela seguinte equação:

$$\frac{A_{t,min}}{s} = 25 \frac{b_w}{f_y} \quad (3.9)$$

em que b_w é a largura da alma da secção.

A adoção de uma armadura mínima de torção garante que a viga não entra em rotura aquando do aparecimento das fissuras por torção, ou seja quando:

$$T_n = T_{cr} \quad (3.10)$$

em que T_{cr} é o momento torsor de fissuração.

A Cláusula 11.6.9.3 estabelece o limite mínimo da área de armadura longitudinal de torção, A_l . Tal como referido atrás, esta armadura é constituída por varões distribuídos ao longo do perímetro de um estribo fechado com área A_t por ramo. Esse limite mínimo é obtido a partir do princípio de igualdade de volume entre a armadura longitudinal e transversal. Assim, o seu cálculo pode ser efetuado da seguinte forma:

$$A_{l,min} = \left(\frac{400xs}{f_y} - 2A_t \right) \left(\frac{x_1 + y_1}{s} \right) \quad (3.11)$$

É de notar que a Eq.3.11 foi derivada para uma secção transversal retangular. Para uma secção em caixão com uma espessura de parede entre $x/10$ e $x/4$, a Eq.3.11 só é aplicável se o primeiro termo, $400xs/f_y$ for multiplicado pelo fator de redução $4h/x$ (Secção 3.2.3.2).

3.2.4.3. Armadura Máxima de Torção

Para a resistência de uma viga à torção, a Cláusula 11.6.9.4 exige que a seguinte condição seja verificada:

$$T_s \leq 4T_c \quad (3.12)$$

Esta verificação tem como objetivo garantir uma rotura dúctil do elemento, levando a armadura de torção a alcançar a cedência antes do betão comprimido atingir a sua capacidade resistente nas escoras.

Com a condição exigida nesta cláusula e através da Eq.3.5 é possível derivar uma expressão que limite superiormente a armadura transversal para todo o tipo de secções. Assim, o limite superior da armadura transversal de torção é calculado do seguinte modo:

$$\frac{A_{t,max}}{s} = \frac{4T_c}{\alpha_t x_1 y_1 f_y} \quad (3.13)$$

3.2.4.4. Espaçamento Máximo das Armaduras

A Cláusula 11.6.8.1 estabelece que o espaçamento longitudinal entre estribos fechados não deve exceder o menor valor entre $(x_1 + y_1)/4$ e $12in (30,5cm)$. Este limite tem como objetivo prevenir uma diminuição drástica da resistência à torção, evitar uma excessiva perda de rigidez à torção após a fissuração e controlar a largura das fendas.

Ainda referente ao espaçamento máximo da armadura transversal, o código define um limite superior absoluto de $12in (30,5cm)$ para controlar a largura das fendas em vigas com secções de grandes dimensões.

Em relação aos varões longitudinais de torção, a Cláusula 11.6.8.2 estabelece um diâmetro mínimo de varões igual a um varão **No.3** (equivale aproximadamente a um varão $\phi 10$). A cláusula ainda exige que estes sejam distribuídos ao longo do perímetro das cintas com um espaçamento máximo de $12in (30,5cm)$. Este limite serve os mesmos objetivos enunciados anteriormente para a limitação do espaçamento dos estribos.

Outra exigência feita por esta cláusula diz respeito à disposição construtiva dos varões. Esta exige que pelo menos um varão longitudinal seja colocado em cada canto das cintas. Esta exigência tem como objetivo garantir uma adequada ancoragem para os ramos que as compõem e proporcionar uma maior eficácia no desenvolvimento da resistência à torção da viga ajudando no controlo da fissuração.

3.2.4.5. Outras Limitações Importantes

A Cláusula 11.6.7.4 requer que a tensão de cedência de cálculo para a armadura de torção seja inferior a **60000psi (414MPa)**. Esta limitação permite um melhor controlo da largura das fissuras diagonais e ajudar a garantir que a cedência da armadura de torção ocorra antes da rotura por esmagamento do betão comprimido nas escoras, evitando assim uma rotura do tipo frágil.

3.2.4.6. Alguns Detalhes Adicionais

O código define alguns detalhes construtivos importantes de referir.

Para os varões longitudinais de canto, é sugerido que o diâmetro destes varões seja superior a **1/16** do espaçamento das cintas, com o objetivo de prevenir a rotura por destacamentos dos cantos (Fig.3.1(b)). Este tipo de rotura tem origem na flexão dos varões longitudinais de canto provocada pela força de desvio na mudança de direção das bielas comprimidas (Fig.3.1(a)).

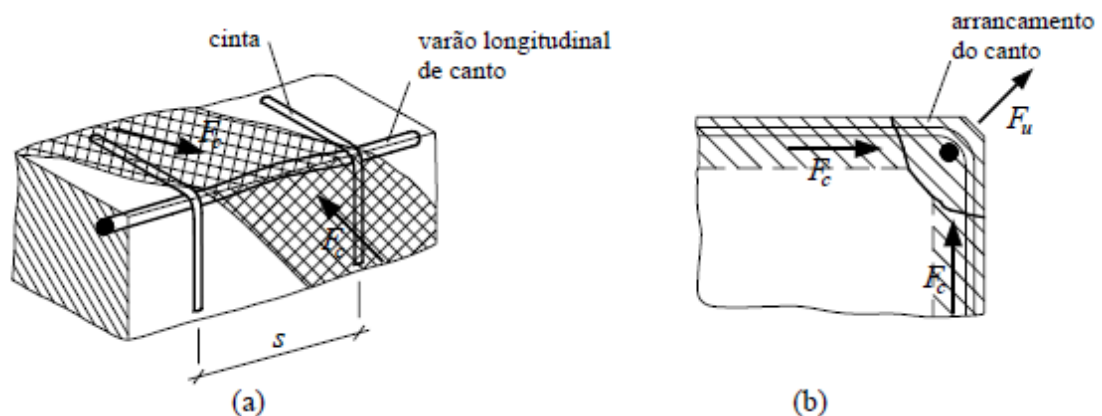


Fig.3.1 - Força de desvio sobre os varões longitudinais de canto. [1]

Para os estribos fechados (cintas) é aconselhável usufruírem de ganchos com uma inclinação de pelo menos 105° em relação à perpendicular da face adjacente e um comprimento de amarração de 16 vezes o diâmetro do varão.

3.3. Código Americano, ACI 318R-11 [2]

3.3.1. Disposições gerais

A Cláusula 11.5 dá a conhecer que o dimensionamento de vigas à torção, feito por este código, é baseado num tubo de parede fina tendo como base a analogia da treliça espacial. Uma viga sujeita à torção é idealizada como um tubo de parede fina sem núcleo (Fig.3.2(a)). Uma vez fissurada a viga de betão armado à torção, a resistência à torção é fornecida pela cinta de estribos e pelos varões longitudinais colocadas perto da superfície do elemento. Nesta analogia, a resistência é assumida como sendo garantida pela “casca” externa da secção, aproximadamente centrada pela cinta de estribos fechados. Ambos os tipos de secções (cheias e vazadas) são idealizados como tubos de parede fina antes e após a fissuração.

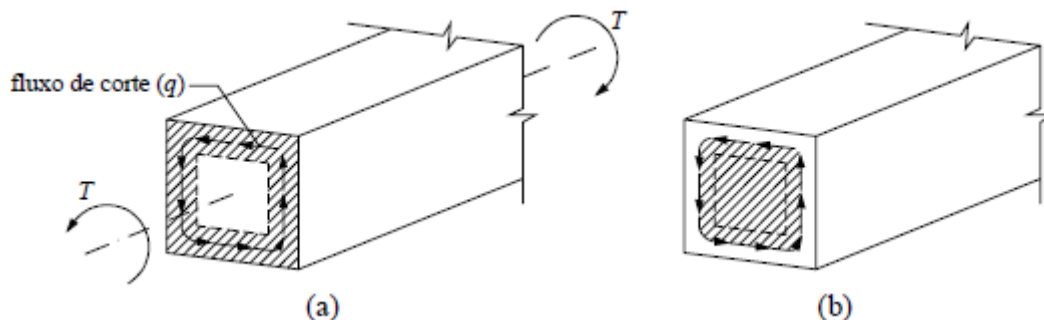


Fig.3.2 - Tubo de parede fina e fluxo de corte [2]

Num tubo fechado de parede fina, o produto da tensão tangencial (τ) com a espessura da parede (t), em qualquer ponto do perímetro, é designado por fluxo de corte (q): $q = \tau t$. O fluxo de corte devido à torção desenvolve-se como ilustrado na Fig.3.2 coincidindo com a linha média da espessura das paredes. Em qualquer ponto do perímetro da secção do tubo, a tensão tangencial induzida pela torção é constante e calculada do seguinte modo:

$$\tau = \frac{T}{2A_o t} \quad (3.14)$$

em que:

T = momento torsor atuante;

A_o = área limitada pela linha média do fluxo de corte;

t = espessura da parede onde τ está a ser calculado.

É de notar que para uma secção vazada, A_o inclui a área oca interior como mostra a Fig.3.2(b).

À semelhança do código ACI 318R-89 [1], a Cláusula 11.5.1 permite desprezar o efeito do momento torsor se o momento torsor reduzido T_u for menor que um quarto do momento torsor crítico ou de fissuração T_{cr} . Para elementos sem pré-esforço a condição é dada por:

$$T_u \leq \phi \frac{T_{cr}}{4} = \phi \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \right) \quad (3.15)$$

em que:

ϕ = fator redutor de resistência;

λ = fator de modificação;

A_{cp} = área limitada pelo perímetro exterior da secção;

p_{cp} = perímetro exterior da secção;

f'_c = resistência à compressão do betão.

Para uma secção oca, A_{cp} deve ser substituído por A_g que corresponde somente à área de betão, sem inclusão da parte oca interior. A Cláusula 11.5.2.1 estabelece que, se num elemento o momento torsor reduzido T_u for requerido para manter o equilíbrio e este exceder o valor mínimo especificado na Cláusula 11.5.1, então o elemento deve ser dimensionado de acordo com as Cláusulas 11.5.3 à 11.5.6, afim de suportar o momento torsor.

3.3.2. Verificação da Segurança à Torção

A Cláusula 11.5.3.5 determina que a armadura de torção deve ser dimensionada tendo em vista a seguinte condição de segurança:

$$T_u \leq \phi T_n \quad (3.16)$$

em que T_n é valor nominar do momento torsor resistente. No cálculo de T_u , deve ser assumido que este é apenas conferido pelas armaduras de torção, ou seja, o momento torsor resistente conferido pelo betão é nulo ($T_c = 0$).

3.3.3. Momento Torsor Resistente

3.3.3.1. Limitação da Tensão

Para o caso da torção pura e para os dois tipos de secção (cheia e vazada), a Cláusula 11.5.3.1 limita as dimensões da secção transversal de modo a verificar a seguinte condição:

$$\frac{T_u p_h}{1,7 A_{oh}^2} \leq \phi 8 \sqrt{f'_c} \quad (3.17)$$

em que:

p_h = perímetro da linha média da armadura transversal de torção;

A_{oh} = área limitada pela linha média da armadura transversal de torção.

Na Inequação 3.17, o termo do lado esquerdo representa a tensão tangencial devido à torção, cuja expressão é obtida através da Eq.3.14 com A_o , após a fissuração, igual a $0,85 A_{oh}$ e t igual a A_{oh}/p_h .

Ao contrario do ACI 318-89 [1] que incorpora uma expressão para o cálculo da armadura máxima transversal de torção, a limitação da tensão nas escoras no ACI 318R-11 constitui a única forma de limitar superiormente esta armadura, por forma a evitar uma rotura frágil por compressão do betão nas escoras. Assim, através da Inequação 3.17 é possível derivar uma expressão referente à armadura transversal máxima. Substituindo T_u/ϕ por T_n dado pela Eq.3.19 e resolvendo em ordem a A_t/s para a situação limite, o limite superior da armadura transversal de torção é calculada por:

$$\frac{A_{t,máx}}{s} = \frac{6,8 \sqrt{f'_c} A_{oh}^2}{A_o p_h f_{yt} \cot \theta} \quad (3.18)$$

A Cláusula 11.5.3.3 especifica que, se a espessura da parede de uma secção vazada for inferior a A_{oh}/p_h , o primeiro termo da Eq.3.17 deve ser substituído por $T_u/(1,7 A_{oh} t)$, onde t é a espessura das paredes da secção oca no local onde as tensões estão a ser verificadas. Para secções vazadas, a Eq.3.18 fica da seguinte forma:

$$\frac{A_{t,máx}}{s} = \frac{6,8 \sqrt{f'_c} A_{oh} t}{A_o f_{yt} \cot \theta} \quad (3.19)$$

3.3.3.2. Cálculo da Armadura de Torção

A Cláusula 11.5.3.6 determina que a armadura transversal de torção seja calculada através da seguinte equação:

$$T_n = \frac{2 A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (3.20)$$

em que:

A_t = área de um ramo da cinta de torção;

f_{yt} = tensão de cedência da armadura transversal;

s = espaçamento longitudinal da armadura transversal;

θ = ângulo das diagonais de betão comprimido com o eixo do elemento.

A área A_o deve ser determinada através de uma análise do elemento em estudo. Porém, a cláusula permite simplificar o seu cálculo igualando-a a $0,85 A_{oh}$. Para secções retangulares cheias e vazadas, a área A_{oh} é definida como está ilustrada na Fig.3.3.

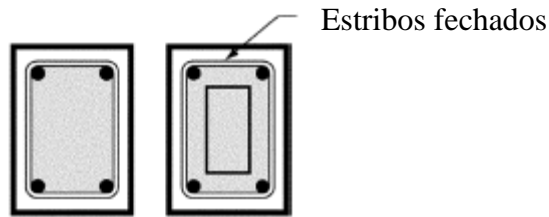


Fig.3.3 - Definição da área A_{oh} [2]

No que diz respeito ao ângulo θ , a cláusula limita-o num intervalo que vai desde 30° a 60°. Esta limitação tem como objetivo o controlo da fissuração do elemento. Para elementos sem pré-esforço, a cláusula aconselha um ângulo θ de 45°.

A Cláusula 11.5.3.7 determina que a armadura longitudinal de torção A_l deve ser superior a:

$$A_l = \frac{A_t}{s} p_h \left(\frac{f_{yt}}{f_y} \right) \cot^2 \theta \quad (3.21)$$

em que:

A_l = armadura longitudinal de torção.

$\frac{A_t}{s}$ = armadura transversal de torção;

f_y = tensão de cedência da armadura longitudinal;

θ = ângulo das diagonais de betão comprimido com o eixo do elemento.

Repare-se que o ângulo θ tem influência na quantidade de armadura dimensionada. À medida que θ é reduzido, a quantidade de cintas necessárias à resistencia é menor. Já a quantidade de armadura longitudinal necessária à resistencia é maior quanto menor for θ . Este ângulo pode ser obtido por análise ou podem ser adoptados os valores recomendados pela cláusula 11.6.3.6 e o mesmo valor deve ser usado nas Eqs. 3.20 e 3.21. A partir da Eq.3.21 o termo $\cot \theta$ pode ser expresso do seguinte modo:

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{A_l f_{yt} s}{A_t p_h f_{yt}}} \quad (3.22)$$

3.3.4. Exigências para a Armadura de Torção

3.3.4.1. Constituição e Pormenorização da Armadura de Torção

A Cláusula 11.5.4.1 define que a armadura de torção deve ser constituída por varões longitudinais e por uma ou mais soluções para armadura transversal, em particular por estribos fechados ou cintas perpendiculares ao eixo do elemento. Quer a armadura longitudinal quer a armadura transversal são requeridas para resistir à torção. Os estribos devem ser fechados pois a fissuração inclinada, devida à torção, pode ocorrer em todas as faces dos elementos.

A Cláusula 11.5.4.2 permite escolher uma das seguintes soluções de amarração para a armadura transversal de torção:

- um gancho típico a 135° em torno do varão longitudinal;
- de acordo com as Cláusulas 12.13.2.1, 12.13.2.2, ou 12.13.2.3 (disposições relativas à amarração da armadura de alma) nas regiões onde o destacamento do betão em torno da amarração se encontre restringido por um banzo, uma laje ou elemento similar.

A Cláusula 11.5.4.3 especifica que a armadura longitudinal de torção deve ser amarrada em ambas as extremidades do elemento. Por exemplo, se momentos torsores de alta magnitude atuarem perto das extremidades de uma viga, as armaduras longitudinais deverão estar amarradas adequadamente para resistir a estes momentos. Deve assim ser previsto um comprimento de amarração suficiente, exterior à face de apoio, por forma a ser capaz de desenvolver uma força de tracção necessária aos varões. A solução pode requerer ganchos ou varões horizontais em forma de “U” sobrepostos com a armadura longitudinal de torção.

No caso de secções ocas, a Cláusula 11.5.4.4 define um valor mínimo para a distância entre a linha média da armadura transversal de torção e a face interior da parede da secção oca. Esse valor mínimo é igual a $0,5A_{oh}/p_h$. A cláusula aconselha que os estribos fechados calculados para a torção de uma secção oca sejam colocados na metade exterior da espessura efectiva da parede, onde a espessura da parede pode ser considerada igual a A_{oh}/p_h .

3.3.4.2. Armadura Mínima de Torção

A Cláusula 11.5.5.1 exige que seja atribuída uma área mínima de torção em todas as regiões onde T_u excede o momento torsor especificado na Cláusula 11.5.1.

Quando é requerida armadura de torção pela cláusula anterior e para o caso da torção pura, a Cláusula 11.5.5.2 determina que a área mínima da armadura transversal deve ser calculada do seguinte modo:

$$\frac{A_{t,min}}{s} = 0,375 \sqrt{f'_c} \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (3.23)$$

mas nunca inferior a $(25 b_w s) / f_{yt}$ e em que b_w é a espessura da parede em análise.

A Cláusula 11.5.5.3 determina que, quando é requerida armadura de torção pela Cláusula 11.5.5.1, a área mínima da armadura longitudinal deve ser calculada pela seguinte equação:

$$A_{l,min} = \frac{5 \sqrt{f'_c} A_{cp}}{f_y} - \left(\frac{A_t}{s} \right) p_h \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (3.24)$$

onde A_t/s não deve ser menor que $25 b_w / f_{yt}$.

3.3.4.3. Espaçamento Máximo das Armaduras

A Cláusula 11.5.6.1 estabelece que o espaçamento da armadura transversal de torção não deve exceder o menor valor entre $p_h/8$ e $12in (30,5cm)$.

Quanto aos varões longitudinais de torção, a Cláusula 11.5.6.2 exige que a armadura longitudinal requerida para resistir à torção deve ser distribuída ao longo do perímetro das cintas fechadas com um espaçamento máximo de $12in (30,5cm)$. Os varões longitudinais devem ser colocados dentro das cintas com pelo menos um varão longitudinal em cada canto da cinta. O diâmetro mínimo exigido aos varões longitudinais é igual a 0,042 vezes do espaçamento entre cintas, mas superior a $3/8 in$ (aproximadamente equivalente a um varão $\phi 10$).

3.3.4.4. Outras Limitações Importantes

A Cláusula 11.5.3.4 requer que a tensão de cedência de cálculo para a armadura de torção seja inferior a $60000psi (414MPa)$.

3.4. Código Europeu, MC90 [9]

3.4.1. Definições e Hipóteses Básicas

A Cláusula 6.3.5.1 fornece alguns conceitos básicos sobre a temática da torção. Esta informa que as disposições regulamentares sobre a torção aplicam-se a elementos lineares sujeitos à torção combinada com esforço axial e esforço transversal. Também são aplicadas a secções transversais cheias, vazadas ou abertas, nos quais os efeitos do corte longitudinal e de flexão transversal são desprezados. Estes efeitos podem ser desprezados devido à espessura das paredes da secção ou das condições de carga. Na referida cláusula é também feita a distinção entre a torção de equilíbrio e de compatibilidade, torção circular e de empenamento, e são estabelecidas as condições em que a torção de compatibilidade pode ser desprezada.

A alínea d) da cláusula em análise informa que os métodos de verificação dados pelas cláusulas 6.3.5.2 e 6.3.5.3 assumem que o elemento à torção contém fissuras inclinadas e as paredes são dimensionadas com base no modelo de treliça. Para o objetivo deste trabalho, a análise será focada na cláusula 6.3.5.2 referente à torção circulatoria.

3.4.2. Torção Circulatoria

3.4.2.1. Secções Transversais Ocas ou Poligonais Convexas

A Cláusula 6.3.5.2(a) determina que, para efeitos de cálculo, a espessura efetiva da parede t_{ef} não deve:

- exceder a espessura real da parede em estudo;
- ser menor que duas vezes a distância entre a face externa da parede e a linha média que une os eixos da armadura longitudinal, com objetivo de permitir o fluxo de tensões de corte que coincide com a linha média da espessura da parede efetiva.

Como primeira aproximação, a espessura efetiva pode ser assumida como sendo igual à espessura da parede real, se essa for inferior a A/u . Caso contrário, a cláusula calcula a espessura efetiva do seguinte modo:

$$t_{ef} = \frac{A}{u} \quad (3.25)$$

em que:

A = área da secção transversal, limitada por u ;

u = perímetro exterior da secção transversal.

3.4.2.2. Secções Cheias

A Cláusula 6.3.5.2(b) substitui a secção cheia real por uma secção oca equivalente onde a espessura das “paredes” não devem ser menores que duas vezes a distância entre a face exterior e a linha que une os eixos das armaduras longitudinais. Como primeira aproximação da espessura efetiva, esta deve ser assumida como sendo igual à espessura definida na Eq.3.25. A Fig.3.4 ilustra a determinação da espessura efetiva da parede da secção oca equivalente, assim como a localização da linha média de fluxo de corte para a mesma secção.

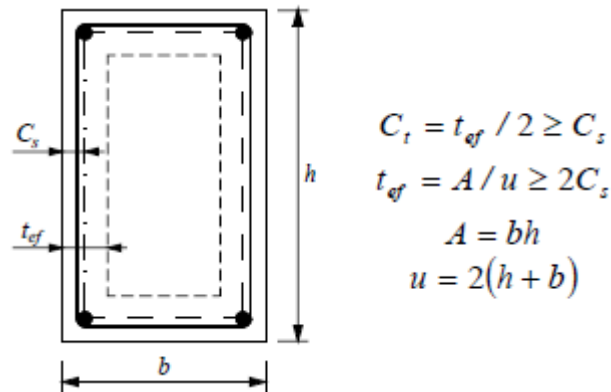


Fig.3.4 - Espessura efetiva e linha média do fluxo de corte (MC 90) [9].

3.4.2.3. Fluxo de Corte e Forças de Corte

Numa secção oca poligonal convexa (real ou equivalente), o fluxo de corte devido à torção T_{sd} pode ser assumido como sendo constante e a sua linha de ação coincidente com a linha média de cada parede. O cálculo do fluxo de corte é feito do seguinte modo:

$$\tau_{ti} t_{efi} = \frac{T_{sd}}{2A_{ef} \delta} \quad (3.26)$$

em que:

τ_{ti} = tensão tangencial devida à torção na parede i ;

t_{efi} = espessura efetiva da parede i ;

A_{ef} = área limitada pela linha média das paredes;

δ = coeficiente numérico que tem em conta as imperfeições e/ou incertezas do modelo de cálculo.

Quanto à força de corte $V_{sdi,t}$ que atua na parede i , esta é calculada por:

$$V_{sdi,t} = \frac{T_{sd} z_i}{2A_{ef} \delta} \quad (3.27)$$

em que z_i é a distância entre os pontos de intersecção da sua linha média com as das paredes adjacentes para a parede i (Fig.3.5).

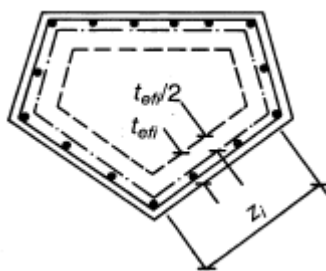


Fig.3.5 - Noção de t_{eff} e z_i para as Eq.3.26 e Eq.3.27. [9]

Para uma secção retangular (incluindo secções ocas) de dimensões b_x e b_y , em que $b_y > b_x$, o coeficiente δ é calculado do seguinte modo:

$$\delta = 1,0 - 0,25 \frac{b_x}{b_y} \quad (3.28)$$

O coeficiente δ tem em conta o facto da resistência efetiva à torção ser geralmente inferior à prevista teoricamente. Uma das razões para este facto é a dificuldade que o fluxo de corte tem em rodar nas junções das paredes (nós). O resultado é a redução de A_{ef} para todo o tipo de secção exceto as de forma circular. Assim, o dimensionamento é efetuado para um momento torsor efetivo $T_{sd,ef} = T_{sd} / \delta$, em que $\delta \leq 1$.

3.4.2.4. Efeitos das Ações

Para o caso da torção pura, as paredes são dimensionadas apenas para a força de corte devidas à torção $V_{sdi,t}$ sendo essa força calculada pela Eq.3.27, ou seja, $V_{sdi} = V_{sdi,t}$.

3.4.2.4. Verificações

No âmbito da torção circular, o código define várias verificações para os dois estados do elemento separadamente: Estado I (elemento não fissurado) e Estado II (elemento fissurado).

3.4.2.4.1 Paredes não Fissuradas

Para o caso da torção pura, uma parede pode ser tratada como não fissurada (Fig.3.6) se a tensão máxima do betão $\sigma_{ct,m\acute{a}x}$ for menor ou igual que f_{ctd} . Note-se que $\sigma_{ct,m\acute{a}x}$ é resultante das tensões σ_{sdi} e τ_{sdi} aplicadas pela torção. Já a tensão f_{ctd} é igual a $f_{ctk,min} / 1,5$ e a tensão $f_{ctk,min}$ é dada pelo Quadro 2.1.2 do código em estudo.

A verificação $\sigma_{ct,m\acute{a}x} \leq f_{ctd}$ deve ser feita no centro da parede e as tensões de corte devido à torção devem ser estimada pela Eq.3.26.

Se a condição for satisfeita, então a tensão principal de compressão resultante das tensões de torção σ_{sdi} e τ_{sdi} deve ser menor que f_{cdl} e em que $f_{cdl} = 0,85(1 - f_{ck}/250)f_{cd}$.

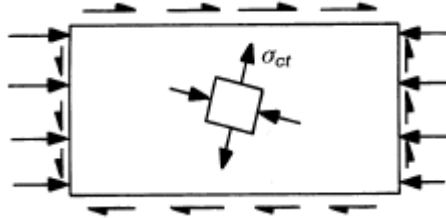


Fig.3.6 - Parede sem fissuras. [9]

3.4.2.4.2 Paredes com Fissuras Inclinadas

O modelo plástico de treliça espacial (Fig.3.7) só pode ser usado quando as seguintes disposições forem respeitadas:

- o espaçamento entre estribos não excede $u_s/8$, em que u_s é o perímetro do estribo;
- os estribos possibilitam uma continuidade entre paredes;
- em cada ligação de paredes, existe um varão longitudinal com diâmetro de pelo menos $s/16$, em que s é o espaçamento dos estribos.

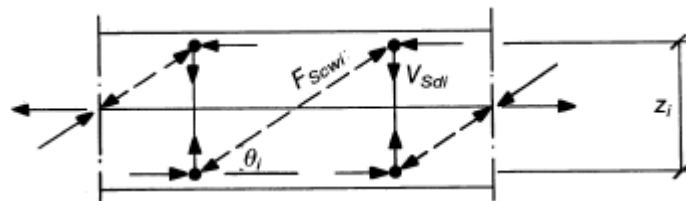


Fig.3.7 - Modelo de treliça plana para uma parede. [9]

O ângulo θ_i entre a diagonal de compressão e a direção longitudinal do elemento pode ser escolhido num intervalo que vai de 18° a 45°.

As verificações requeridas para as forças que derivam do modelo de treliça são as seguintes:

(1) Força longitudinal

Para as armaduras longitudinais de torção, a condição $F_{sli} \leq F_{Rli}$ deve ser verificada, sendo F_{sli} a força longitudinal atuante na parede i e F_{Rli} a força longitudinal resistente na parede i .

Para o caso da torção pura, a força longitudinal atuante na parede i é calculada por:

$$F_{Sli} = V_{Sdi} \cot \theta_i \quad (3.29)$$

em que θ_i é o ângulo entre a diagonal de compressão e a direção longitudinal do elemento.

Para a situação em que ambas as armaduras de torção entram em cedência, o modelo de treliça espacial transforma-se num mecanismo plástico. Assim, a força longitudinal resistente é obtida a partir de:

$$F_{Rli} = A_{Si} f_{yd} \quad (3.30)$$

em que:

A_{Si} = área de armadura longitudinal ordinária na parede i ;

f_{yd} = tensão de cedência da armadura ordinária.

No geral, a armadura requerida pela força F_{Rli} deve ser distribuída ao longo do comprimento de z_i (Fig.3.7). Contudo, para secções pequenas, esta pode ser concentrada nos extremos do comprimento z_i .

Se $F_{Sli} < 0$, nenhuma verificação é necessária desde que a parede seja tratada como fissurada e as escoras de compressão verifiquem as condições do ponto (2) abaixo.

(2) Escoras de compressão inclinada nas paredes de betão

Para controlar o nível de tensões nas escoras, a condição $F_{Scwi} \leq F_{Rcwi}$ deve ser verificada, sendo F_{Scwi} a força de compressão atuante na parede i e F_{Rcwi} a força de compressão resistente na parede i .

A força de compressão diagonal da parede i é calculada do seguinte modo:

$$F_{Scwi} = \frac{V_{Sdi}}{\sin \theta_i} \quad (3.31)$$

em que V_{Sdi} é a força de corte atuante na parede i .

Quanto à força de compressão resistente na parede i , esta é calculada através de:

$$F_{Rcwi} = f_{cd2} t_i z_i \cos \theta_i \quad (3.32)$$

onde $f_{cd2} = 0,60(1 - f_{ck}/250)f_{cd}$.

Se a condição $F_{Scwi} \leq F_{Rcwi}$ não for violada, espera-se que ambas as armaduras de torção entrem em cedência evitando assim uma rotura frágil por excesso de armadura. Desta forma, é possível derivar uma expressão referente à armadura transversal máxima através desta condição. Substituindo F_{Scwi} pela Eq.3.31, com V_{Sdi} substituído por F_{Rtwi} dado pela Eq.3.35 e F_{Rcwi} pela Eq.3.32, obtém-se:

$$\frac{A_{swi,max}}{s} = \frac{f_{cd2} t_i \sin^2 \theta}{f_{yd}} \quad (3.33)$$

(3) *Tensão na armadura transversal*

Para as armaduras transversais da viga sujeita à torção, a condição $F_{Stwi} \leq F_{Rtwi}$ deve ser verificada, em que F_{Stwi} é a força transversal atuante na parede i e F_{Rtwi} é a força transversal resistente na parede i .

A força de tração na armadura transversal resulta diretamente do equilíbrio de cargas externas na direção vertical do modelo da treliça plana e é calculada por:

$$F_{Stwi} = V_{Sdi} \quad (3.34)$$

Considerando as armaduras de torção em cedência, a força transversal resistente é calculada por:

$$F_{Rtwi} = A_{swi} f_{yd} \cot \theta_i \frac{z_i}{s} \quad (3.35)$$

onde A_{swi} é a área de uma unidade de armadura transversal na parede i (por exemplo, um ramo de estribos numa secção cheia).

A partir das Eqs. 3.30 e 3.35, o termo $\tan \theta$ pode ser expresso do seguinte modo:

$$\tan^2 \theta_i = \frac{A_{sw} f_{ywd} z_i}{A_{si} f_{yd} s} \quad (3.36)$$

Note-se que a Eq.3.36 é determinada pela proporção entre a armadura transversal e longitudinal de torção. Tal como no código anterior, o ângulo θ que as escoras de compressão do betão fazem com o eixo do elemento vai influenciar a área da armadura de torção.

3.4.3. Armadura de Torção

A Cláusula 9.2.2.4 estabelece que as disposições construtivas definidas para armaduras longitudinais e transversais específicas à resistência da flexão e do esforço transversal (Cláusula 9.2.2.1 e 9.2.2.2, respetivamente) são aplicáveis ao caso da torção, não tendo nenhuma disposição específica para a armadura de torção.

Contudo, o código MC 90 faz duas exigências em relação à pormenorização da armadura de torção. Este exige que o espaçamento das cintas não exceda o valor de $u_{ef}/8$, onde u_{ef} é o perímetro das próprias cintas. Quanto aos varões longitudinais, estes devem ser distribuídos pelo perímetro interior das cintas, com pelo menos um varão em cada canto, e o espaçamento entre eles não deve exceder $350mm$.

Os objetivos gerais destas exigências são os mesmo que os apresentados aquando da análise das disposições referentes às armaduras nos códigos americanos.

3.4.3.1. Armadura Mínima não Específica para a Torção

A Cláusula 9.2.2.1 exige uma armadura mínima longitudinal para elementos de betão armado de modo a evitar um colapso quando estes são sujeitos a uma perda de resistência imprevista. Esta armadura não é específica para resistir à torção.

A Cláusula 9.2.2.2 estabelece uma área mínima para a armadura transversal. Esta é calculada através da seguinte equação:

$$\frac{A_{t,min}}{s} = \rho_{w,min} b_w \sin \alpha \quad (3.37)$$

em que:

$\rho_{w,min}$ = taxa mínima de armadura transversal (determinada pela Tabela 9.2.1 do código em análise);

b_w = espessura da parede i;

α = ângulo entre a armadura transversal e o eixo do elemento.

Esta cláusula ainda exige que o diâmetro das cintas seja superior a $5mm$ ou a um quarto do diâmetro máximo dos varões longitudinais previstos.

3.4.3.2. Pormenorização da Armadura de Torção

Apesar do código não apresentar uma solução específica para a pormenorização da armadura de torção, a Cláusula 9.2.2.2 apresenta alguns exemplos para dispor as armaduras numa secção retangular como ilustrados na Fig.3.8.

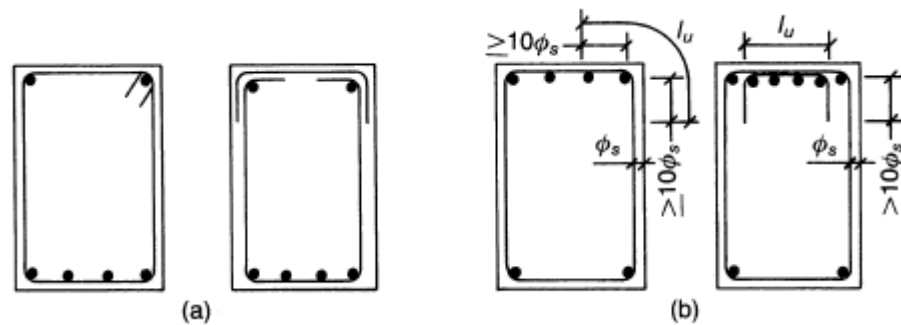


Fig.3.8 - Possíveis soluções de pormenorização. (a) estribo em zona de compressão. (b) estribo em zona tracionada. [9]

3.5. Código Europeu, MC10 [10]

3.5.1. Generalidades

A Cláusula 7.3.4 obriga que, no caso do equilíbrio estático de uma estrutura depender da resistência de torção dos elementos estruturais, seja feito um dimensionamento de torção completo abrangendo ambos os limites de segurança (último e de serviço).

No caso de estruturas que não dependem da resistência do momento torsor para a sua estabilidade, estas estão dispensadas da verificação da resistência à torção aos estados limites últimos e apenas é requerida uma armadura mínima (transversal e longitudinal) para o controlo da fissuração seguindo, para tal, a disposição 7.13.5.2 do código em análise.

À semelhança do Código MC90 [9], para determinar a resistência torsional de vigas em caixão e de vigas com secção cheia, o MC10 baseia-se no modelo de secção transversal tubular, como mostra a Fig.3.9.

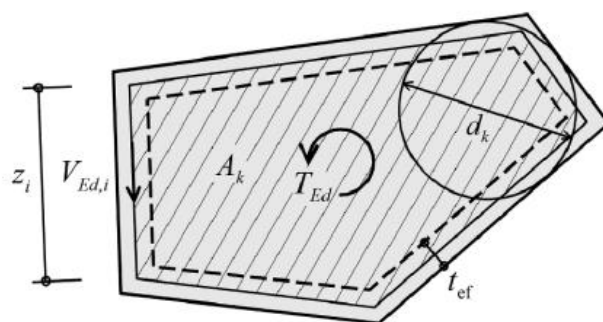


Fig.3.9 - Definição da seção transversal oca tipo. [10]

Se as dimensões e a armadura da secção transversal não mudarem abruptamente ao longo da direção longitudinal, o fluxo de corte devido à torção pode ser assumido como constante ao longo do perímetro da área efetiva da secção e o momento torsor pode assim ser calculado a partir da seguinte igualdade:

$$V_{Ed,i} = \frac{T_{Ed}}{2A_k} z_i \quad (3.38)$$

em que:

$V_{Ed,i}$ = esforço transversal atuante na parede i ;

T_{Ed} = momento torsor atuante;

A_k = área efetiva da secção transversal;

z_i = distância da parede i , entre os pontos de intersecção da sua linha média com as das paredes adjacentes (Fig.3.9).

O Código MC10 não tem qualquer disposição específica para o dimensionamento de vigas sujeitas à torção, remetendo para a Cláusula 7.3.3 aplicada à verificação do ELU ao esforço transversal. Contudo, para secções transversais cheias, o código exige que a espessura efetiva seja determinada através da seguinte relação:

$$t_{ef} = \frac{d_k}{8} \quad (3.39)$$

em que:

t_{ef} = espessura efetiva da secção transversal cheia;

d_k = diâmetro do círculo que pode ser inscrito na parte mais estreita da secção transversal (Fig.3.9).

A espessura efetiva deve ser superior ao dobro da distância entre a superfície externa da secção e a linha média da armadura longitudinal. No caso de vigas em caixão e se a parede for armada em ambas as faces, a espessura efetiva corresponde à espessura da parede.

A cláusula exige que a armadura longitudinal de torção seja distribuída uniformemente pelo perímetro das cintas, ou seja concentrada nos cantos das mesmas. Para este tipo de armadura, o código não possui disposições específicas à torção.

3.5.2. Armadura de Torção

3.5.2.1. Dimensionamento

Para secção vazada, a Cláusula 7.3.4 define que a resistência máxima ao corte de vigas não armadas é dada pela resistência ao corte conferida pelo betão, $V_{Rd,c}$. Já para vigas armadas, a resistência máxima é dada pela resistência máxima permitida ao corte, $V_{Rd,max}$.

Para elementos que possuam uma taxa mínima de armadura de corte igual a:

$$\rho_w \geq 0,08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (3.40)$$

em que:

f_{ck} = valor característico da tensão de rotura do betão à compressão;

f_{yk} = valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras,

a cláusula 7.3.3.3 determina a resistência de uma viga sujeita ao esforço transversal igual ao somatório das resistências $V_{Rd,c}$ e $V_{Rd,s}$, onde $V_{Rd,c}$ é a resistência conferida pelo betão e $V_{Rd,s}$ é a resistência conferida pela armadura de corte na tensão de cedência. Adaptando as expressões para o cálculo de $V_{Rd,c}$ e $V_{Rd,s}$ para o caso específico da torção pura, estas resistências serão determinadas da seguinte forma:

$$V_{Rd,c} = k_c \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} z_i t_{ef,i} \quad (3.41)$$

em que:

k_c = fator de redução do betão determinado por: $k_c = 0,5(30/f_{ck})^{1/3} \leq 0,5$;

f_{ck}/γ_c = valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão (f_{cd});

onde o valor $\sqrt{f_{ck}}$ não deve ser considerado superior a 8 MPa;

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,i}}{s_w} z_i f_{yw,d} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (3.42)$$

em que:

$A_{sw,i}/s_w$ = armadura transversal;

$f_{yw,d}$ = valor de cálculo da tensão de cedência do aço da armadura transversal.

Quanto à resistência máxima das vigas ao esforço transversal, e adaptando a equação apresentada pelo código para este limite ao caso específico da torção pura, a resistência máxima ao corte é determinada pela seguinte equação:

$$V_{Rd,m\acute{a}x} = k_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} t_{ef,i} \sin \theta \cos \theta \quad (3.43)$$

em que:

θ = ângulo formado pelas escoras comprimidas de betão com o eixo da viga.

Para vigas de secção retangular e para o caso da torção pura, a cláusula 7.3.3 exige que a seguinte condição seja verificada:

$$(T_{Ed}/T_{Rd,m\acute{a}x})^2 \leq 1 \quad (3.44)$$

em que:

T_{Ed} = momento torsor atuante;

$T_{Rd,m\acute{a}x}$ = momento torsor resistente máximo.

A cláusula define o momento torsor resistente máximo através da seguinte equação:

$$T_{Rd,m\acute{a}x} = k_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} t_{ef} 2A_k \sin \theta \cos \theta \quad (3.45)$$

Recorde-se que o código MC10 não especifica nenhum limite máximo para a armadura de torção. Porém, é possível deduzir uma expressão para o seu cálculo. Na Eq.3.38, substitui-se T_{Ed} pela Eq.3.45 e iguala-se à Eq.3.42. Resolvendo em ordem a $A_{sw,m\acute{a}x}/s_w$ obtém-se o limite máximo da área da armadura transversal, definido por:

$$\frac{A_{sw,m\acute{a}x}}{s_w} = \frac{k_c f_{cd} t_{ef} \sin^2 \theta}{f_{ywd}} \quad (3.46)$$

Quando se conhece a armadura e se pretende averiguar a capacidade resistente da secção, o ângulo θ pode ser definido através das Eqs. 3.41 e 3.42, obtendo:

$$\tan^2 \theta_i = \frac{A_{sw,i} f_{ywd} z_i}{A_{si} f_{yd} s} \quad (3.47)$$

3.5.2.2. Armadura Mínima não Específica à Torção

A Cláusula 7.13.5.2 exige uma armadura mínima para os elementos de betão armado a fim de garantir a segurança ao estado limite de serviço. Esta cláusula define duas expressões para os limites inferiores das áreas de cada tipo de armadura (longitudinal e transversal). Para este

trabalho só tem interesse o estudo da limitação inferior da área de armadura transversal, sendo esta definida por:

$$\frac{A_{sw,min}}{s_w} = 0,12 \sqrt{f_{ck}} \frac{b_w}{f_{yk}} \quad (3.48)$$

em que b_w é a espessura da parede.

3.5.2.3. Pormenorização da Armadura de Torção

A Cláusula 7.13.5.2 define algumas disposições relativas à pormenorização da armadura transversal de torção. São elas as seguintes:

- cintas perpendiculares ao eixo do elemento;
- armadura transversal em espiral;
- as cintas devem envolver as armaduras longitudinais com o objetivo de as forças das cintas atuarem sobre a altura do braço de alavanca das forças internas.

3.6. Código Europeu, EC2 [11]

3.6.1. Generalidades

À semelhança do código MC10 [10], a Cláusula 6.3.1(1)P do código em estudo começa por referir que será sempre necessária uma verificação de segurança à torção para os estados limites (último e de serviço) em todos os casos em que o equilíbrio estático de uma estrutura dependa da resistência à torção dos elementos dessa mesma estrutura.

De forma igual aos códigos europeus anteriores, a Cláusula 6.3.1(3) informa que a resistência das secções à torção é calculada com base numa secção fechada de paredes finas, no qual o equilíbrio é satisfeito por um fluxo fechado de tensões tangenciais. Para secções cheias é idealizada uma secção oca equivalente para proceder ao estudo do elemento sujeito à torção. Para secções ocas, a espessura equivalente da parede nunca deverá exceder a espessura da secção real.

3.6.2. Método de Cálculo

Como foi referido anteriormente, a resistência das secções à torção é calculada com base num tudo de secção fechada de paredes finas onde um fluxo de tensões de corte circula à volta do perímetro da parede da secção transversal (Fig.3.10). Este tipo de torção é

designado por torção circulatoria ou de St. Venant. O modelo do tubo poligonal convexo de parede fina é válido tanto para secções ocas como para secções cheias. Para analisar este modelo, é adotada a analogia da treliça espacial com ângulo das bielas variável. À semelhança dos códigos MC90 [9] e MC10 [10], as equações apresentadas no código em estudo referem-se ao equilíbrio de uma treliça plana para uma parede constituinte dessa mesma treliça. Em geral, o EC2 calcula a posição da linha média do fluxo de corte e a espessura efetiva do tubo equivalente com base em regras triviais.

A Fig.3.10 ilustra uma secção transversal efetiva com as notações e definições usadas pelo EC2 nas cláusulas referentes à torção para uma secção poligonal convexa.

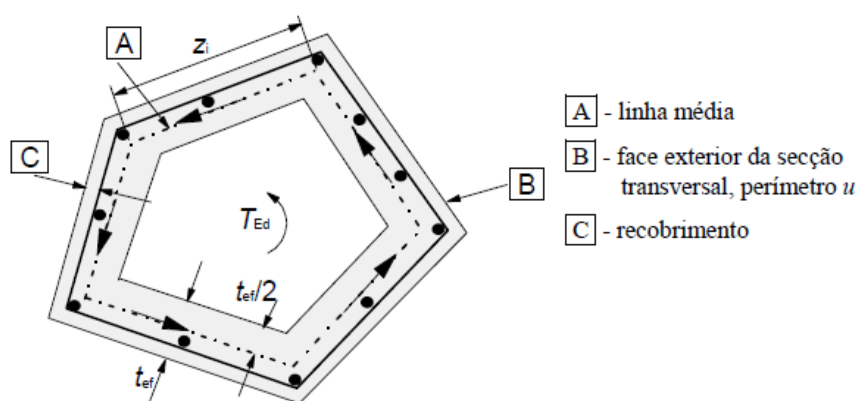


Fig.3.10 - Notações e definições. [11]

A Cláusula 6.3.2(1) especifica que a tensão tangencial numa parede de uma secção sujeita a um momento torsor é calculada a partir de:

$$\tau_{t,i} t_{ef,i} = \frac{T_{Ed}}{2A_k} \quad (3.49)$$

em que:

$\tau_{t,i}$ = tensão tangencial de torção na parede i ;

$t_{ef,i}$ = espessura efetiva da parede i ;

T_{Ed} = momento torsor atuante;

A_k = área limitada pelas linhas médias das paredes, incluindo áreas interiores ocas.

A cláusula faz uma nota referente a $t_{ef,i}$. Para secções cheias, a espessura efetiva pode ser considerada igual a A/u , em que A é a área total da secção transversal definida pelo contorno exterior (incluindo áreas ocas) e u é o perímetro do contorno exterior da secção. Contudo, à semelhança do código MC90, $t_{ef,i}$ não deve ser inferior ao dobro da distância entre a face exterior da secção e o eixo das armaduras longitudinais (Fig.3.4). No caso de secções ocas, a espessura real é o limite superior.

Quanto à força de corte $V_{Ed,i}$ numa parede i devido à torção, esta é obtida por:

$$V_{Ed} = \tau_{t,i} t_{sf,i} z_i \quad (3.50)$$

em que z_i é o comprimento da parede i , definido pela distância entre os pontos de intersecção de paredes adjacentes (Fig.3.10).

A Eq.3.50 resulta da inclusão de $\tau_{t,i}$, definido pela Eq.3.26, na Eq.3.27. Contudo, o cálculo da armadura transversal para cada parede i é omissa. O procedimento para determinar esta armadura é o mesmo que o utilizado na determinação da armadura transversal de esforço transverso.

Para elementos com armadura de esforço transverso constituída por estribos verticais, a Cláusula 6.2.3(3) define o valor de cálculo do esforço transverso resistente como sendo o menor valor entre $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,máx}$, em que $V_{Rd,s}$ é o esforço transverso resistente e $V_{Rd,máx}$ o esforço transverso resistente máximo permitido pelo código.

Adotando a expressão dada pelo código referente ao cálculo de $V_{Rd,s}$ para o caso da torção pura e tendo em conta a Eq.3.50, é possível deduzir uma expressão para o cálculo da armadura transversal de torção descrita em baixo:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{st}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \Rightarrow \frac{A_{st,i}}{s} = \frac{V_{Ed,i}}{z_i f_{ywd} \cot \theta} = \frac{T_{Ed}}{2 A_k f_{ywd} \cot \theta} \quad (3.51)$$

em que:

$A_{st,i}$ = área da armadura transversal de torção na parede i ;

s = espaçamento entre cintas;

f_{ywd} = valor de cálculo da tensão de cedência da armadura transversal.

A Cláusula 6.3.2(3) define que a área da armadura longitudinal de torção, $\sum A_{sl}$, é calculada através da seguinte equação:

$$\frac{\sum A_{sl} f_{yd}}{u_k} = \frac{T_{Ed}}{2 A_k} \cot \theta \quad (3.52)$$

em que:

A_{sl} = área da armadura longitudinal de torção;

f_{yd} = valor de cálculo da tensão de cedência da armadura longitudinal;

u_k = perímetro da área A_k ;

θ = ângulo das escoras comprimidas.

Esta cláusula exige que a armadura longitudinal de torção seja distribuída ao longo do comprimento lateral z_i , salvo em casos com secções pequenas onde a armadura é concentrada nas extremidades das paredes.

Para garantir que um elemento não sofra uma rotura frágil devido à compressão das escoras do betão, a Cláusula 6.3.2(4) exige que a condição $T_{Ed}/T_{Rd,max} \leq 1,0$ seja cumprida sendo $T_{Rd,max}$ o valor de cálculo máximo para o momento torsor resistente.

Este momento torsor resistente $T_{Rd,max}$ é determinado do seguinte modo:

$$T_{Rd,max} = 2v\alpha_{cw}f_{cd}A_k t_{ef,i} \sin \theta \cos \theta \quad (3.53)$$

em que:

v = coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal e é obtido por: $v = 0,6[1 - (f_{ck}/250)]$;

α_{cw} = coeficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido (para estruturas não pré-esforçadas, $\alpha_{cw} = 1$);

f_{cd} = valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão.

Para a condição $T_{Ed}/T_{Rd,max} \leq 1,0$ não ser violada, é necessário definir um valor máximo de armadura. Porém o código em análise não possui disposições específicas à torção para a determinação deste limite. Ainda assim, é possível derivar uma expressão referente à armadura transversal máxima através das Eqs. 3.51 e 3.53. Substituindo T_{Ed} da Eq.3.51 pela Eq. 3.53, obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{A_{swi,max}}{s} = \frac{v\alpha_{cw}f_{cd}t_{ef,i}\sin^2\theta}{f_{yd}} \quad (3.54)$$

Quando se conhece a armadura e se pretende averiguar a capacidade resistente da secção, o ângulo θ pode ser determinado através da combinação das Eqs.3.51 e 3.52, obtendo a seguinte expressão:

$$\tan^2\theta = \frac{A_{sw}f_{ywd}u_k}{A_{sl}f_{yld}s} \quad (3.55)$$

3.6.3. Armadura de Torção

O presente código não possui disposições específicas para a limitação da área de armadura de torção, remetendo sempre sobre este aspeto para cláusulas relacionadas com o esforço transversal e o momento fletor.

Contudo na Cláusula 9.2.3 são feitas algumas exigências quanto à pormenorização construtiva da armadura de torção. São elas as seguintes:

- as cintas de torção deverão ser fechadas e amarradas por meio de sobreposições ou de ganchos e formar um ângulo de 90° com o eixo do elemento;

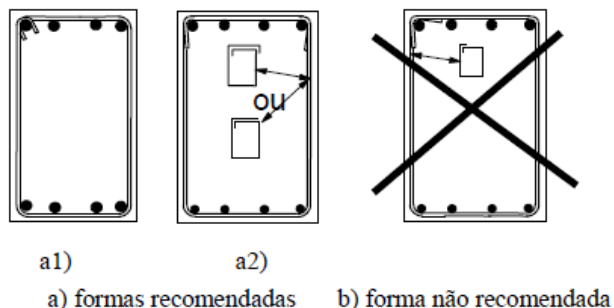


Fig.3.11 - Exemplos de soluções para as cintas. [11]

- o disposto nas cláusulas 9.2.2(5) e (6) é geralmente suficiente para definir a quantidade mínima necessária de cintas de torção, assim como seu espaçamento mínimo;
- o espaçamento longitudinal das cintas de torção não deverá exceder $u/8$, ou o limite indicado na cláusula 9.2.2(6) ou a menor dimensão da secção transversal da viga;
- Os varões longitudinais deverão ser dispostos de modo a que haja pelo menos um varão em cada canto, sendo os restantes distribuídos uniformemente ao longo do contorno interno das cintas, com espaçamento máximo de 350 mm.

3.6.3.1. Armadura Mínima e Máxima não Específica à Torção

Relativamente à armadura longitudinal de tração e de compressão, a Cláusula 9.2.1.1(1) define o limite inferior desta armadura enquanto que a Cláusula 9.2.1.1(3) define o limite superior.

Para a armadura transversal, a Cláusula 9.2.2(5) fornece a expressão de cálculo para a taxa de armadura de esforço transversal que, resolvida em ordem a A_{sw}/s , define o limite mínimo da armadura transversal. Adotando esse limite para o caso da torção pura, obtém-se:

$$\frac{A_{st,min}}{s} = \rho_{w,min} t_{ef,i} \sin \alpha \quad (3.56)$$

em que:

α = ângulo formado pelas cintas com o eixo longitudinal;

$\rho_{w,min}$ = taxa mínima de armadura calculada por: $\rho_{w,min} = 0,08 \sqrt{f_{ck}} / f_{yk}$, em que f_{ck} é o valor característico da tensão de rotura do betão à compressão e f_{yk} é o valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras.

3.7. Código Canadano, CSA A23.3-04 [14]

3.7.1. Considerações Gerais

À semelhança dos códigos anteriores (com exceção do ACI 318R-89 [1]), para determinar a resistência torsional de vigas em caixão e de vigas com secção cheia, o CSA A23.3-04 baseia-se no modelo de secção transversal tubular.

No que toca ao cálculo do valor do momento torsor de fissuração, e para o caso de vigas sem pré-esforço, a Cláusula 11.2.9.1 do código em análise fornece a seguinte equação:

$$T_{cr} = \left(\frac{A_c^2}{p_c} \right) 0,38 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} \quad (3.57)$$

em que:

A_c = área da secção transversal, incluindo a área oca em peças vazadas;

p_c = perímetro da secção transversal;

λ = fator que contabiliza betão leves;

ϕ_c = fator de resistência do betão;

f'_c = valor da resistência do betão à compressão;

No caso de secções ocas com uma espessura de parede inferior a $0,75 A_c / p_c$, o parâmetro A_c da Eq.3.57 deve ser substituído por $1,5 A_g$, sendo A_g apenas a área de betão (a área oca não é contabilizada).

À semelhança dos códigos anteriores, a Cláusula 11.2.9.2 especifica que, em estruturas estaticamente indeterminadas onde a redução do momento torsor pode ocorrer devido à redistribuição de esforços internos, este pode ser reduzido a $0,67 T_{cr}$ nas zonas de apoio após a redistribuição de esforços.

3.7.2. Verificação da Segurança à Torção

A Cláusula 11.3.10.2 determina que o dimensionamento de secções transversais à torção deve verificar a seguinte condição de segurança:

$$T_r \geq T_f \quad (3.58)$$

em que:

T_r = valor do momento torsor resistente;

T_f = valor do momento torsor reduzido na secção transversal.

A Cláusula 11.3.10.3 define o cálculo do momento torsor resistente T_r através da seguinte equação:

$$T_r = 2A_o \frac{\phi_s A_t f_y}{s} \cot \theta \quad (3.59)$$

em que:

A_o = área delimitada pelo fluxo de corte provocado pelo momento torsor. No caso de secções ocas, esta inclui a área oca. O código simplifica o cálculo de A_o igualando-o a $0,85A_{oh}$, sendo A_{oh} a área delimitada pela linha média das cintas;

ϕ_s = fator de resistência das armaduras;

A_t = área de um ramo do estribo fechado;

f_y = valor da tensão de cedência da armadura transversal;

s = espaçamento da armadura transversal paralelo ao eixo do elemento;

θ = ângulo de inclinação entre as diagonais de compressão e o eixo do elemento.

3.7.3. Limitação da Tensão

A Cláusula 11.3.10.1 especifica que para casos em que as ações do esforço transversal e da torção são combinadas, a área da armadura transversal do elemento deve ter o valor mínimo da soma das áreas previstas para resistirem cada um dos esforços separadamente.

Contudo é necessário verificar primeiro as dimensões da secção transversal para evitar o esmagamento do betão nas escoras. Para o caso da torção pura, a Cláusula 11.3.10.4 exige que a seguinte condição seja verificada:

$$\frac{T_r p_h}{1,7 A_{oh}^2} \leq 0,25 \phi_c f'_c \quad (3.60)$$

em que p_h é o perímetro da linha média das cintas.

O código CSA A23.3-04 não especifica o limite máximo para a armadura transversal de torção, no entanto é possível deduzir uma expressão para o cálculo desse limite através das Eqs. 3.59 e 3.60. Assim, a armadura máxima transversal pode ser calculada do seguinte modo:

$$\frac{A_{t,max}}{s} = \frac{0,21 f'_c A_{oh}^2}{A_o f_y \cot \theta p_h} \quad (3.61)$$

Para vigas de secção vazada com uma espessura de parede $t \leq A_{oh}/p_h$, o termo do lado esquerdo da Eq.3.59 deve ser substituído por $T_r/1,7A_{oh}t$. Assim, para secções vazadas, a Eq.3.61 fica:

$$\frac{A_{t,max}}{s} = \frac{0,21 f'_c A_{oh} t}{A_o f_y \cot \theta} \quad (3.62)$$

A Cláusula 11.3.10.6 obriga a que a armadura longitudinal satisfaça os requisitos da Cláusula 11.3.9 do código em estudo. Essa cláusula especifica que, em cada secção, a armadura longitudinal deve ser dimensionada para resistir às forças de tensão adicionais causadas pelo corte. Tendo em vista que a armadura longitudinal deve ser proporcional ao momento torsor reduzido em toda a secção e adotando a Cláusula 11.3.9.2 para o caso da torção pura, a força desenvolvida na armadura longitudinal deve ser maior ou igual que:

$$F_{lt} = \frac{0,45 p_h T_f}{2 A_o} \cot \theta \quad (3.63)$$

Quando se conhece a armadura e se pretende averiguar a capacidade resistente da secção, o ângulo θ pode ser determinado através da combinação das Eqs.3.59 e 3.63, obtendo a seguinte expressão:

$$\tan^2 \theta = \frac{0,45 p_h A_t f_{yt}}{A_l f_{ly} s} \quad (3.64)$$

Repare-se que o ângulo θ das escoras de compressão do betão tem influência na quantidade relativa de armadura dimensionada (armadura transversal relativamente à armadura longitudinal).

3.7.4. Exigências para a Armadura de Torção

3.7.4.1. Constituição da Armadura de Torção

A Cláusula 11.2.6 exige que um elemento sujeito à torção seja constituído por uma armadura longitudinal e uma ou mais das soluções seguidamente apresentadas para a armadura transversal:

- estribos fechados perpendiculares ao eixo do elemento;
- armadura em espiral.

Na Cláusula 11.2.7 são especificados os tipos de ancoragens que uma armadura transversal específica à torção pode ter. Um exemplo destas ancoragens são ganchos padrão de 135°.

Esta cláusula ainda exige que pelo menos um varão longitudinal seja colocado em cada canto das cintas. O diâmetro dos varões longitudinais são limitados inferiormente por $s/16$, onde s é o espaçamento entre estribos.

Quanto à ancoragem da armadura longitudinal, esta deve ser ancorada em cada extremidade do elemento por embebimento, gancho ou por um dispositivo mecânico ou ainda por uma combinação das três soluções.

3.7.4.2. Armadura Mínima de Corte

A Cláusula 11.2.8.1 exige que seja atribuída uma área mínima de torção em todas as regiões onde o momento torsor T_f exceda $0,25T_{cr}$.

A Cláusula 11.2.8.2 determina que, quando é requerida armadura de torção pela cláusula anterior, a área mínima da armadura transversal deve ser calculada por uma expressão que, adaptada ao caso da torção pura, fica:

$$\frac{A_v}{s} = \frac{A_{t,min}}{s} = 0,06 \sqrt{f'_c} \frac{b_w}{f_y} \quad (3.65)$$

em que b_w é a espessura da parede.

Quanto ao espaçamento máximo, a Cláusula 11.3.8.3 especifica que caso o momento torsor T_f exceda $0,25T_{cr}$, os espaçamentos definidos pela Cláusula 11.3.8.1 serão reduzidos para metade. Assim, o espaçamento máximo exigido à armadura transversal de torção é de $0,35d_v$ ou 300 mm.

3.8. Análise Comparativa entre Regulamentos. Conclusões.

Com base nas disposições regulamentares apresentadas nas secções anteriores, apresentam-se quadros resumos e comparativos (Quadros 3.1 a 3.7).

Quadro 3.1 - Limitação da espessura para a secção transversal de um elemento sujeito à torção.

ACI 318R-89 [1]	<p><u>Cláusula 11.6.1.2</u></p> <p>Espessura h em secção vazada:</p> <ul style="list-style-type: none"> – $h \geq x/4$, secção cheia equivalente; – $x/10 \leq h \leq x/4$, secção cheia equivalente se $\sum x^2 y$ for multiplicado por $4h/x$; – $h < x/10$, a rigidez das paredes entra para os cálculos.
-----------------	---

Quadro 3.2 (cont.) - Limitação da espessura para a secção transversal de um elemento sujeito à torção.

ACI 318R-11 [2]	<ul style="list-style-type: none"> – secção cheia: $t = A_{cp}/p_{cp}$; – secção vazada: $t = t_{real}$ se $t_{real} < A_{oh}/p_h$. Caso não verifique, a secção vazada passa a ser considerada como secção cheia.
MC90 [9]	<p><u>Cláusula 6.3.5.2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – secção cheia: $t_{ef,i} = A/u$ e $t_{ef} >$ dobro da distância entre a face externa e a linha média da parede; – secção vazada: $t_{ef} \leq t_{real}$. Caso não verifique, a secção vazada passa a ser considerada como secção cheia.
MC10 [10]	<p><u>Cláusula 7.3.4.1</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – secção oca secção cheia: $t_{ef} = d_k/8$; – secção vazada: $t_{ef} \leq t_{real}$.
EC2 [11]	<p><u>Cláusula 6.3.2(1)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – secção cheia: $t_{ef} = A/u$ e $t_{ef} >$ dobro da distância entre a face externa e a linha média da parede; – secção vazada: $t_{ef} \leq t_{real}$. Caso não verifique, a secção vazada passa a ser considerada como secção cheia.
CSA A23.3-04 [14]	<ul style="list-style-type: none"> – secção cheia: $t = A_{cp}/p_{cp}$; – secção vazada: $t = t_{real}$ se $t_{real} < A_{oh}/p_h$. Caso não verifique, a secção vazada passa a ser considerada como secção cheia.

Quadro 3.2 - Cálculo das tensões e forças de corte devidas à torção.

MC90 [9]	<p><u>Cláusula 6.3.5.2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Fluxo de corte: $\tau_{ti} t_{efi} = \frac{T_{sd}}{2A_{ef} \delta}$ <ul style="list-style-type: none"> – Força de corte: $V_{sdi,t} = \frac{T_{sd} z_i}{2A_{ef} \delta}$
MC10 [10]	<p><u>Cláusula 7.3.4.1</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Força de corte: $V_{Ed,i} = \frac{T_{Ed}}{2A_k} z_i$

Quadro 3.2 (cont.) - Cálculo das tensões e forças de corte devidas à torção.

EC2 [11]	<p><u>Cláusula 6.3.2(1)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Fluxo de corte: $\tau_{t,i} t_{ef,i} = \frac{T_{Ed}}{2A_k}$ <ul style="list-style-type: none"> Força de corte: $V_{Ed} = \tau_{t,i} t_{ef,i} z_i$
----------	--

Quadro 3.3 - Verificação das condições de segurança à torção.

ACI 318R-89 [1]	<p><u>Cláusula 11.6.5</u></p> <p>Condição: $T_u \leq \phi T_n$, em que:</p> <ul style="list-style-type: none"> para secção cheia $T_n = \frac{x^2 y}{3} (2,4 \sqrt{f'_c}) + \alpha_t \frac{x_1 y_1 A_t f_y}{s}$ <ul style="list-style-type: none"> para secção vazada: $T_n = \left(\frac{4h}{x}\right) \frac{x^2 y}{3} (2,4 \sqrt{f'_c}) + \alpha_t \frac{x_1 y_1 A_t f_y}{s}$ <p>em que $x/10 < h \leq x/4$.</p>
ACI 318R-11 [2]	<p><u>Cláusula 11.5.3.5</u></p> <p>Condição: $T_u \leq \phi T_n$, em que:</p> $T_n = \frac{2A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta$
MC90 [9]	<p><u>Cláusula 6.3.5.2</u></p> <p>Condição para:</p> <ul style="list-style-type: none"> armadura longitudinal: $F_{Sli} \leq F_{Rli}$ em que $F_{Rli} = A_{si} f_{yd}$ <ul style="list-style-type: none"> escoras de compressão: $F_{scwi} \leq F_{RCwi}$ em que $F_{RCwi} = f_{cd2} t_i z_i \cos \theta$ <ul style="list-style-type: none"> armadura transversal: $F_{Sltwi} \leq F_{Rtwi}$ em que $F_{Rtwi} = A_{swi} f_{yd} \cot \theta \frac{z_i}{s}$

Quadro 3.3 (cont.) - Verificação das condições de segurança à torção.

<p>MC10 [10]</p>	<p><u>Cláusula 7.3.4.1</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Secção vazada <p>Condição: $V_{Rd} \leq V_{Rd,max}$, em que</p> $V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s}$ $V_{Rd,max} = k_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} t_{ef,i} \sin \theta \cos \theta$ <ul style="list-style-type: none"> – Secção cheias <p>Condição: $(T_{Ed}/T_{Rd,max})^2 \leq 1$ em que</p> $T_{Rd,max} = k_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} t_{ef,i} 2A_k \sin \theta \cos \theta$
<p>EC2 [11]</p>	<p><u>Cláusula 6.3.2(4)</u></p> <p>Condição: $T_{Ed}/T_{Rd,max} \leq 1,0$, em que</p> $T_{Rd,max} = 2\nu\alpha_{cw}f_{cd}A_k t_{ef,i} \sin \theta \cos \theta$
<p>CSA A23.3-04 [14]</p>	<p><u>Cláusula 11.3.10.2</u></p> <p>Condição: $T_r \geq T_f$, em que</p> $T_r = 2A_o \frac{\phi_s A_t f_y}{s} \cot \theta$

Quadro 3.4 - Tensão limite para garantir a ductilidade.

<p>ACI 318R-89 [1]</p>	<p><u>Cláusula 11.6.9.4</u></p> $T_s \leq 4T_c$
<p>ACI 318R-11 [2]</p>	<p><u>Cláusula 11.5.3.1</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – secção cheia: $\frac{T_u p_h}{1,7 A_{oh}^2} \leq \phi 8 \sqrt{f'_c}$ <ul style="list-style-type: none"> – secção vazada: para uma espessura inferior a A_{oh}/p_h, o primeiro termo da condição anterior deve ser substituído por $T_u/(1,7 A_{oh} t)$.
<p>CSA A23.3-04 [14]</p>	<p><u>Cláusula 11.3.10.4</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – secção cheia: $\frac{T_u p_h}{1,7 A_{oh}^2} \leq 0,25 \phi_c \sqrt{f'_c}$ <ul style="list-style-type: none"> – secção vazada: para uma espessura inferior a A_{oh}/p_h, o primeiro termo da condição anterior deve ser substituído por $T_u/(1,7 A_{oh} t)$.

Quadro 3.3 - Especificidades para a armadura transversal de torção.

<p>ACI 318R-89 [1]</p>	<p><u>Cláusula 11.6.9.2</u></p> <p>– área mínima:</p> $\frac{A_{t,min}}{s} = 25 \frac{b_w}{f_y}$ <p><u>Cláusula 11.6.9.4</u></p> <p>– área máxima:</p> $\frac{A_{t,máx}}{s} = \frac{4T_c}{\alpha_t x_l y_l f_y}$ <p><u>Cláusula 11.6.8.1</u></p> <p>– espaçamento máximo entre cintas:</p> $s_{máx} = \min \left\{ \begin{array}{l} (x_l + y_l)/4 \\ 12 \text{ in } (30,5 \text{ cm}) \end{array} \right.$
<p>ACI 318R-11 [2]</p>	<p><u>Cláusula 11.5.5.2</u></p> <p>– área mínima:</p> $\frac{A_{t,min}}{s} = 0,375 \sqrt{f'_c} \frac{b_w}{f_{yt}} \geq 25 b_w / f_{yt}$ <p><u>Cláusula 11.5.3.1</u></p> <p>– área máxima para secção cheia:</p> $\frac{A_{t,máx}}{s} = \frac{6,8 \sqrt{f'_c} A_{oh}^2}{A_o p_h f_{yt} \cot \theta}$ <p>– área máxima para secção vazada:</p> $\frac{A_{t,máx}}{s} = \frac{6,8 \sqrt{f'_c} A_{oh} t}{A_o f_{yt} \cot \theta}$ <p><u>Cláusula 11.5.6.1</u></p> <p>– espaçamento máximo entre cintas:</p> $s_{máx} = \min \left\{ \begin{array}{l} p_h / 8 \\ 12 \text{ in } (30,5 \text{ cm}) \end{array} \right.$
<p>MC90 [9]</p>	<p>– área máxima <u>NÃO</u> específica da torção:</p> $\frac{A_{sw,máx}}{s} = \frac{f_{c2} t_i \sin^2 \theta}{f_{yd}}$ <p><u>Cláusula 9.2.2.2</u></p> <p>– área mínima <u>NÃO</u> específica da torção:</p> $\frac{A_{sw,min}}{s} = \rho_{w,min} b_w \sin \alpha$ <p><u>Cláusula 9.2.2.4</u></p> <p>– espaçamento máximo entre cintas:</p> $s_{máx} = u_{ef} / 8$

Quadro 3.4 (cont.) - Especificidades para a armadura transversal de torção.

<p>MC10 [10]</p>	<ul style="list-style-type: none"> – área máxima <u>NÃO</u> específica da torção: $\frac{A_{sw,max}}{s_w} = \frac{k_c f_{cd} t_{ef} \sin^2 \theta}{f_{ywd}}$ <p><u>Cláusula 7.13.5.2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – área mínima <u>NÃO</u> específica da torção: $\frac{A_{s,min}}{s} = 0,12 \sqrt{f_{ck}} \frac{b_w}{f_{yk}}$
<p>EC2 [11]</p>	<ul style="list-style-type: none"> – área máxima <u>NÃO</u> específica da torção: $\frac{A_{swi,max}}{s} = \frac{\nu \alpha_{cw} f_{cd} t_{ef,i} \sin^2 \theta}{f_{yd}}$ <p><u>Cláusula 9.2.2(5)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – área mínima <u>NÃO</u> específica da torção: $\frac{A_{sw,min}}{s} = \rho_{w,min} t_{ef} \sin \alpha$ <p><u>Cláusula 9.2.2(6)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – espaçamento máximo entre cintas: $s_{max} = u/8$
<p>CSA A23.3-04 [14]</p>	<p><u>Cláusula 11.3.10.4</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – área máxima para secção cheia: $\frac{A_{t,max}}{s} = \frac{0,21 f'_c A_{oh}^2}{A_o p_h f_{yt} \cot \theta}$ – área máxima para secção vazada: $\frac{A_{t,max}}{s} = \frac{0,21 f'_c A_{oh} t}{A_o f_{yt} \cot \theta}$ <p><u>Cláusula 11.2.8.2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – área mínima: $\frac{A_v}{s} = \frac{A_{t,min}}{s} = 0,06 \sqrt{f'_c} \frac{b_w}{f_y}$ <p><u>Cláusula 11.3.8.3</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – espaçamento máximo entre cintas: $s_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,35 d_v \\ 300 \text{ mm} \end{array} \right.$

Quadro 3.5 - Especificidades para a armadura longitudinal de torção.

<p>ACI 318R-89 [1]</p>	<p><u>Cláusula 11.6.9.3</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – área mínima para secção cheia: $A_{l,min} = \left(\frac{400xs}{f_y} - 2A_t \right) \left(\frac{x_l + y_l}{s} \right)$ <ul style="list-style-type: none"> – área mínima para secção vazada: $A_{l,min} = \left(\frac{4h}{x} \frac{400xs}{f_y} - 2A_t \right) \left(\frac{x_l + y_l}{s} \right)$ <p><u>Cláusula 11.6.8.2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – diâmetro mínimo dos varões: No.3 ($\approx \phi 10$) – espaçamento máximo entre varões: $s_{m\acute{a}x} = 12 \text{ in } (30,5 \text{ cm})$
<p>ACI 318R-11 [2]</p>	<p><u>Cláusula 11.5.5.3</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – área mínima: $A_{l,min} = \frac{5\sqrt{f'_c} A_{cp}}{f_y} - \left(\frac{A_t}{s} \right) p_h \frac{f_{yt}}{f_y}$ <p>onde $A_t/s > 25b_w/f_{yt}$.</p> <p><u>Cláusula 11.5.6.2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – diâmetro mínimo dos varões: $0,042s > \text{No.3 } (\approx \phi 10)$ – espaçamento máximo entre varões: $s_{m\acute{a}x} = 12 \text{ in } (30,5 \text{ cm})$
<p>MC90 [9]</p>	<p><u>Cláusula 9.2.2.4:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – espaçamento máximo entre varões: $s_{m\acute{a}x} = 350 \text{ mm}$
<p>EC2 [11]</p>	<p><u>Cláusula 9.2.3:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – espaçamento máximo entre varões: $s_{m\acute{a}x} = 350 \text{ mm}$

Refira-se que o tratamento dos documentos normativos sobre a problemática da torção não aparece resumido nos quadros anteriores. O estudo feito revela um grande contraste entre documentos normativos, não permitindo, assim, uma análise comparativa adequada. Contudo é importante referir alguns aspetos dos documentos normativos analisados.

No que diz respeito aos modelos base, e de entre os códigos analisados, o código americano ACI 318R-89 [1] é o único documento normativo que se baseia integralmente na teoria da flexão enviesada. Todos os restantes documentos têm como base a analogia da treliça espacial, porém, com alguns métodos de cálculo distintos no que diz respeito ao dimensionamento de um elemento sujeito à torção. Para o código americano ACI 318R-11 [2], e para o código canadiano CSA A23.3-04 [14], o cálculo de dimensionamento tem por base o equilíbrio global da treliça espacial que caracteriza a viga em estudo. Para os restantes códigos (códigos modelo europeu MC90 [9], MC10 [10] e o Eurocódigo 2 de 2010 [11]), o cálculo de dimensionamento tem por base o equilíbrio de uma treliça plana, correspondente a uma parede plana da treliça espacial que compõe a secção da viga. As diferenças nestes dois tipos de cálculos têm apenas consequência na formulação utilizada.

No que se refere à ductilidade em torção, e de entre os códigos analisados, os códigos americanos (ACI 318R-89 [1] e ACI 318R-11 [2],) são os únicos que especificam uma quantidade mínima para ambas as armaduras de torção (longitudinal e transversal). O código canadiano (CSA A23.3-04 [14]) limita apenas a armadura transversal de torção. Os restantes documentos analisados não possuem disposições específicas para o cálculo das armaduras de torção, remetendo assim para disposições referentes às armaduras de flexão e de esforço transversal. No que diz respeito à armadura máxima de torção, o código ACI 318R-89 [1] é o único que possui uma disposição específica. Contudo, este limita superiormente apenas a armadura transversal de torção. Todos os outros documentos normativos analisados controlam indiretamente a quantidade máxima de armadura de torção através dos valores admissíveis que estes fixam para a tensão de compressão nas escoras.

CAPÍTULO 4 - Análise da Ductilidade das Vigas de Referência

4.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se aproveitar os resultados experimentais referentes aos ensaios à torção pura e até à rotura de vigas de betão armado de diferentes autores disponíveis na literatura consultada, designadamente reproduzir e caracterizar as curvas $T - \theta$. O objetivo é comparar os seus pontos e propriedades características na região última a fim de estudar a ductilidade de vigas de secção retangular cheia e vazada sujeitas à torção pura. Em análise estão 120 vigas.

Numa primeira fase são escolhidos os pontos mais apropriados para o estudo pretendido e de seguida é feita a análise das curvas experimentais tendo sempre em consideração também o comportamento teórico esperado das vigas para as análises comparativas.

Numa segunda fase é definido o índice de ductilidade para cada viga, cujo valor caracteriza de forma direta e prática o comportamento dúctil dos elementos em estudo. Através deste índice são feitas várias análises comparativas com o objetivo de descobrir a influência dos vários parâmetros de estudo considerados na ductilidade das vigas. Os parâmetros em estudo são a resistência à compressão do betão (f_{cm}), a taxa total de armadura de torção (ρ_{tot}), o equilíbrio de volume das armaduras ($m_{b,ef}$), o fator de escala (h/b) e o tipo de secção (secção cheia e vazada). Finalmente é feita uma análise global da ductilidade em torção pura e são apontadas conclusões.

4.2 Caracterização das Curvas $T - \theta$

Tal como referido na Secção 1.2.1 deste trabalho, para compreender a mecânica comportamental de uma viga à torção é possível traçar uma curva comportamental que relaciona o momento torsor (T) imposto às vigas e a rotação transversal por unidade de comprimento (θ). Esta curva poder ser dividida em três zonas comportamentais distintas conforme descrito na mesma secção.

Para uma análise comparativa de vigas é necessário definir pontos característicos para caracterizar uma curva $T - \theta$ qualquer. Estes pontos característicos são definidos pelas

coordenadas $(\theta; T)$ no referencial. Em geral, para o estudo de vigas torção, são definidas as coordenadas a seguir listadas (ver Fig.4.1).

T_{cr} = momento torsor de fissuração;

θ_{cr} = rotação correspondente a T_{cr} ;

T_{cy} = momento torsor correspondente à “cedência” do betão. Este ponto será definido mais à frente neste capítulo, na secção 4.5.1;

θ_{cy} = rotação correspondente a T_{cy} ;

T_{ly} = momento torsor de cedência da armadura longitudinal;

θ_{ly} = rotação correspondente a T_{ly} ;

T_{ty} = momento torsor de cedência da armadura transversal;

θ_{ty} = rotação correspondente a T_{ty} ;

T_r = momento torsor resistente (momento torsor máximo);

θ_r = rotação correspondente a T_r ;

T_u = momento torsor último convencional;

θ_u = rotação correspondente a T_u .

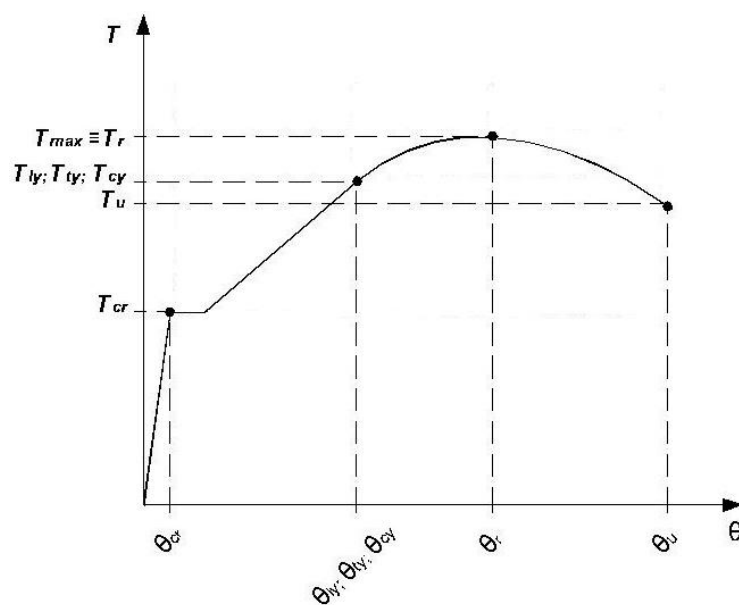


Fig.4.1 - Caracterização de uma curva $T - \theta$ genérica

Para o estudo pretendido apenas é necessário conhecer os pontos onde ocorre a cedência de cada material que constituem a viga (betão e aço), o ponto máximo resistente da viga e o ponto último convencional da viga.

4.3 Vigas de Referência

De entre as vigas encontradas na literatura consultada e ensaiadas à torção pura, foram aproveitadas apenas aquelas que cumpriam as disposições regulamentares específicas referentes à torção. Na seleção das vigas, foram analisadas a quantidade de armadura de torção, o espaçamento máximo das cintas e dos varões longitudinais, a espessura mínima das paredes das secções vazadas, o recobrimento adequado para as armaduras e a própria disposição das armaduras na secção. Para estas verificações foram apenas usados os códigos americanos do Capítulo III (ACI 318R-89 [1] e ACI 318R-02 [2]) visto que estes são os únicos que possuem disposições específicas relativas à quantidade mínima de armadura de torção bem como à limitação da espessura das paredes de secção vazadas (para o último aspeto apenas o código ACI 318R-89 [1]). A verificação da conformidade das vigas de referência pelos códigos americanos referidos é feita no Capítulo 5 deste trabalho. Bernardo em 2003 [7] observou que as vigas que não cumpriam as disposições dos referidos códigos manifestavam um comportamento atípico com curvas $T - \theta$ diferentes da curva padrão ilustrada na Fig. 4.1.

O Anexo I apresenta as principais características das vigas de referência seleccionadas. Ao todo apresentam-se 120 vigas em betão armado, das quais 88 são de secção retangular cheia e 32 de secção retangular vazada. Estas são identificadas de acordo com a designação publicada por cada autor (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Designação das vigas de referência segundo a publicações dos autores.

Autor	Tipo de vigas	Denominação
1968, Hsu [18]	Secção cheia	Vigas B, C, G, I, J, K, M e N
	Secção vazada	Vigas D
1969, Lampert e Thurlimann [25]	Secção vazada	Vigas T
1974, Leonhardt e Schelling [26]	Secção cheia	Vigas VB, VM, VQ, VS e VU
	Secção vazada	Vigas VH
1978, McMullen e Rangan [27]	Secção cheia	Vigas A e B
2001, Koutchkali e Belarbi [24]	Secção cheia	Vigas BUR
2003, Bernardo [7]	Secção vazada	Vigas A, B e C
2004, Fang e Shiau [15]	Secção cheia	Vigas H e N
2007, Chiu, Fang, Young e Shiau [13]	Secção cheia	Vigas NBS
2011, Peng e Wong [29]	Secção cheia	Viga SW
2014, Jeng [23]	Secção vazada	Vigas A, B, C e D

No Quadro I.1 do Anexo I são definidas as principais características geométricas da secção das vigas de referência, nomeadamente: a largura (x) e a altura (y) da secção, a espessura da parede (t , para o caso das secções vazadas) e as dimensões médias das cintas retangulares x_1 e y_1 (ver Fig.4.2). Neste quadro também são apresentadas as características mecânicas da secção, designadamente: a área de armadura longitudinal (A_{st}), a área distribuída de um ramo de armadura transversal (A_{st}/s , sendo s o respectivo espaçamento longitudinal), a taxa de armadura longitudinal (ρ_l), transversal (ρ_t) e total (ρ_{tot}), bem como a relação entre os “volumes” de armaduras caracterizada pelo parâmetro $m_{b,ef}$.

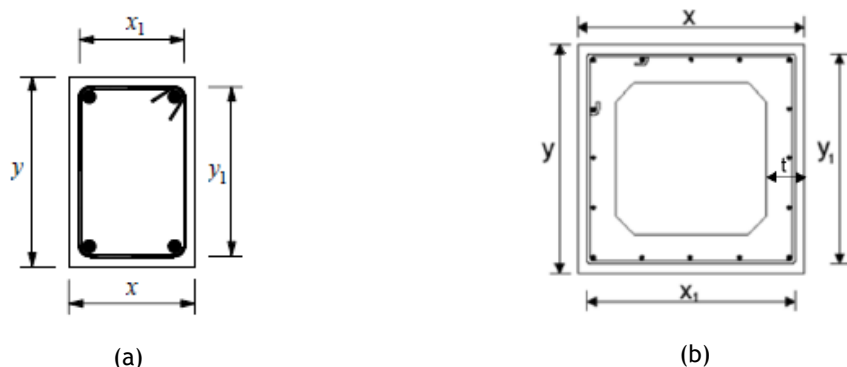


Fig.4.1 - Principais características geométricas. (a) Secção retangular cheia. (b) Secção retangular vazada [32].

No Quadro I.2 do Anexo I são apresentadas as características dos materiais das vigas em estudo, designadamente: a resistência média à compressão (f_{cm}) e à tração (f_{ctm}) do betão, a resistência à compressão do betão referido a provetes cilíndricos (f_{ck}), a tensão média de cedência da armadura longitudinal (f_{lym}) e transversal (f_{tym}), os valores médios do módulo de elasticidade do betão (E_c) e do aço (E_s) e as extensões correspondentes à resistência máxima atingida pelo betão segundo o diagrama parábola-retângulo (ε_{c2}) e segundo o diagrama bi-linear (ε_{c3}) e ao valor último convencional da armadura longitudinal (ε_{lu}) e transversal (ε_{tu}). Para o estudo deste trabalho, o valor convencional da extensão última do betão (ε_{cu}) não foi definido. Este facto permitiu, teoricamente, alargar o intervalo de deformação para o cálculo da curva $T - \theta$ das vigas em estudo e obter o valor convencional último do momento torsor (T_u) para o cálculo do índice de ductilidade. Esta situação será justificada mais à frente neste capítulo, na secção 4.5.1.

Alguns dos parâmetros mencionados anteriormente não são fornecidos pelos autores, o que leva à necessidade de efetuar o seu cálculo. É o caso dos parâmetros ρ_l , ρ_t , ρ_{tot} , m_b , $m_{b,ef}$, f_{ck} , f_{ctm} , E_c , ε_{c0} , ε_{c2} , ε_{c3} , ε_{lu} e ε_{tu} . As seguintes equações mostram como estes foram calculados.

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{A_c} \quad (4.1)$$

$$\rho_t = \frac{A_{st} u}{A_c s} \quad (4.2)$$

$$\rho_{tot} = \rho_l + \rho_t \quad (4.3)$$

$$m_{b,ef} = \frac{A_l s}{A_t 2(x_1 + y_1)} \frac{f_{lym}}{f_{tyl}} \quad (4.4)$$

$$f_{ck} = f_{cm} - \Delta f = f_{cm} - 8 MPa \quad (4.5)$$

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,3 f_{ck}^{2/3} & \leq C50/60 \\ 2,12 \ln(1 + (f_{cm}/10)) & > C50/60 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$E_c = E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_0 = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8 \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{c2} = \begin{cases} 2,00, & f_{ck} < 50 MPa \\ 2,0 + 0,085 (f_{ck} - 50)^{0,53}, & f_{ck} \geq 50 MPa \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_{c3} = \begin{cases} 1,75, & f_{ck} < 50 MPa \\ 1,75 + 0,55 [(f_{ck} - 50)/40], & f_{ck} \geq 50 MPa \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_{lu} = \varepsilon_{tu} = f_{ym} / E_s \quad (4.11)$$

As equações referentes à quantificação das propriedades dos materiais (Eq.4.5 à 4.11) foram definidas segundo o Eurocódigo 2 [11] nas seguintes secções do código: secção 3.1.2(5) (Eq.4.5), Quadro 3.1 da secção 3.1.3 (Eq.4.6 à 4.9) e secção 3.2.7 (Eq.4.11).

Nas equações anteriores, A_c é a área da secção limitada pelo perímetro exterior e u é o perímetro da linha média das cintas.

As unidades dos parâmetros que caracterizam as curvas $T - \theta$ encontram-se todas segundo o Sistema Internacional (SI), sendo efetuado a conversão das mesmas quando não se encontravam como tal (por exemplo a partir das unidades imperiais nos estudos de origem norte americana).

4.4 Caracterização e Análise Comparativa das Curvas $T - \theta$ Experimentais e Teóricas

O objetivo desta secção é organizar, comparar e preparar a informação obtida nos ensaios experimentais realizados pelos autores da bibliografia consultada assim como os resultados obtidos no cálculo das curvas teóricas, por forma a prosseguir ao estudo da ductilidade de vigas à torção pura. Para tal, foram criadas várias folhas de Excel para as 120 vigas de referência onde se fizeram todos os registos, cálculos e análise dos resultados obtidos.

Na recolha de informação das curvas $T - \theta$ experimentais das vigas foi consultada uma base de dados criada no Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior (atualizada em dezembro de 2014). A partir desta base de dados foi possível obter o traçado de todas as curvas $T - \theta$ experimentais em estudo, bem como o momento torsor de fissuração (T_{cr}), o momento torsor resistente máximo (T_r) e as respetivas rotações (θ_{cr} e θ_r). Contudo, apenas a viga T1 de Lampert e Thurlimann [25], as vigas de Bernardo [7], de Fang e Shiau [15] e a viga SW4-1 de Peng e Wong [29] possuíam registos dos momentos torsores de cedência das armaduras. Para determinar os pontos de cedência das restantes vigas foi necessário realizar diversas análises consoante o autor em estudo, análises estas explicadas mais adiante.

No seu artigo, Hsu [18] registou graficamente a evolução das extensões nas armaduras longitudinais e transversais, dos grupos de vigas A e G, em função da razão T/T_u , onde T é o momento torsor e T_u o momento torsor último (resistente). A partir de tais registos e conhecendo-se os valores médios das extensões de cedências das armaduras seria possível obter o valor de T/T_u correspondente à cedências das armaduras de torção. No entanto, os registos dos restantes grupos de vigas foram incorporados num relatório ao qual não foi possível ter acesso. Para os grupos de vigas disponíveis foi feita uma análise individual de cada viga. Com a ajuda do programa *AutoCad*, retirou-se o valor T/T_u da primeira armadura registada a entrar em cedência (longitudinal e transversal) e multiplicou-se esse valor pelo momento torsor resistente último (T_u) da viga, obtendo-se assim o valor do momento torsor de cedência (T_y). Posteriormente o valor T_y foi marcado na curva $T - \theta$ para retirar a rotação correspondente, obtendo-se a coordenada final do ponto de cedência (θ_y ; T_y). Devido à má qualidade das imagens dos gráficos, os pontos de cedência obtidos por esta análise mostraram-se pouco fiáveis dado que, tendo por base uma análise qualitativa das curvas $T - \theta$, estes se localizaram muito longe do início do comportamento dúctil das curvas. A maioria destes pontos cai na fase elasto-linear da curva e, nalguns casos, até fora da curva.

De forma diferente ao apresentado por Hsu, Leonhardt e Schelling [26] apresentaram no seu artigo dois tipos de quadros com informações e registos das vigas ensaiadas. Num primeiro quadro, os autores fornecem, entre outros, o limite elástico das armaduras e respetivos módulos elásticos. Num segundo quadro, são apresentados registos das extensões das armaduras (transversais e longitudinais) em função da carga e da rotação ao longo dos ensaios. Para cada viga foi procurada a extensão que ultrapassava o limite elástico das armaduras e retirado o valor do momento torsor e da rotação correspondente, definindo assim o ponto de cedência $(\theta_y; T_y)$. Apesar de neste caso os pontos de cedência obtidos serem mais fiáveis que no caso anterior, estes voltam a não marcar o início do comportamento dúctil das curvas. Tal como aconteceu com as vigas de Hsu, muitos destes pontos caem fora da curva ou a meio da zona elásto-linear da curva. Isto deve-se à insuficiência de registos do ensaio das vigas onde o traçado das curvas $T - \theta$ foi feito com poucos pontos.

Nos artigos de McMullen e Rangan [27], Chiu, Fang, Young e Shiau [13] e Jeng [23] são apresentadas as curvas $T - \theta$ de todas as vigas ensaiadas. Contudo os autores não fornecem o registo da cedência das armaduras. Assim, novamente com a ajuda do programa *AutoCad*, foi feita uma análise qualitativa às curvas e retirados os pontos de cedência das armaduras, pontos, estes, que marcam a mudança do comportamento da curva $T - \theta$ (de comportamento aproximadamente elásto-linear para um comportamento tendencial de formação de um patamar horizontal). Contudo esta informação, além de pouco fiável, é insuficiente ao estudo pretendido. Para o estudo da influência da taxa de armaduras na ductilidade de uma viga sujeita à torção pura é necessário saber se ambas as armaduras (transversal e longitudinal) entram em cedência ou se uma delas entra primeiro em cedência. Este problema surge também com os autores Lampert e Thurlimann [25], Fang e Shiau [15] e Peng e Wong [29].

Dos autores consultados na bibliografia disponível, apenas Bernardo [7] preparou e ensaiou as suas vigas com o objetivo de estudar a ductilidade das mesmas. O autor registou e distinguiu o instante da cedência das armaduras longitudinais e transversais ao longo dos ensaios. Os seus dados, de entre os encontrados na literatura, são os únicos fiáveis para a utilização dos mesmos no estudo deste trabalho.

Para colmatar o problema da falta de informação sobre a cedência das armaduras nas curvas $T - \theta$ experimentais, decidiu-se recorrer às curvas $T - \theta$ teóricas para observar o comportamento de ambas as curvas e estabelecer uma relação entre o comportamento teórico e experimental das armaduras. O cálculo das curvas teóricas foi realizado por meio de um *software* denominado *Torque 2.0*. Desenvolvido em linguagem *Delphi*, este *software* foi proposto e verificado por Bernardo *et al.* em 2013 [6] com o objetivo de calcular o comportamento global de vigas de betão armado com secção cheia sujeitas à torção pura. O aplicativo computacional calcula e fornece a evolução dos parâmetros mecânicos que

traduzem o comportamento de vigas de betão armado à torção. O cálculo é feito tendo por base o modelo de cálculo GSVATM - Generalized Softened Variable Angle Truss-Model (Generalização do Modelo de Treliça Espacial com Ângulo Variável), modelo este baseado numa generalização do modelo analítico VATM - Variable Angle Truss-Model (Modelo de Treliça Espacial com Ângulo Variável). O modelo VATM oferece uma boa simulação do comportamento de vigas sujeitas à torção ao longo do historial de carregamento e é considerado um dos melhores simuladores para o comportamento último das vigas, sendo um dos modelos de base mais utilizado em documentos normativos e por autores. A principal diferença entre o modelo GSVATM e o modelo VATM reside na introdução da lei constitutiva tensão-extensão para o betão à tração na sua formulação. Para tal é adicionado um “tirante” perpendicular à escora de betão, o qual traduz o comportamento do betão à tração nessa mesma direção. Tal permitiu generalizar o modelo de modo a prever adequadamente todo o estado comportamental das vigas sujeitas à torção (e não apenas o comportamento último como no VATM).

Após o cálculo teórico, o *software Torque 2.0* cria automaticamente um ficheiro Excel onde apresenta os resultados obtidos. Na primeira folha do ficheiro é apresentado um quadro resumo onde estão indicados os pontos característicos das curvas $T - \theta$ das vigas simuladas (ponto de fissuração, ponto máximo e ponto de cedência de armaduras). Nas folhas seguintes do ficheiro é apresentado o traçado de cada curva $T - \theta$ juntamente com uma lista de valores das diversas variáveis (entre outras o momento torsor, a rotação correspondente e as tensões e extensões do betão e das armaduras da viga simulada).

Entre afinações do programa, correções de dados e análise de resultados, foram feitas mais de 360 simulações no *software Torque 2.0* para obter os resultados finais das curvas $T - \theta$. Após uma análise cuidada das mesmas, observaram-se três casos distintos de comportamento. No primeiro caso, o mais esperado, a viga apresenta um comportamento dúctil a partir da cedência de uma ou de ambas as armaduras (longitudinal e transversal) (Fig.4.3(a)). No segundo caso, a viga começa a apresentar um comportamento dúctil notoriamente antes da cedência efetiva das armaduras (Fig.4.3(b)). No terceiro e último caso, a viga apresenta um pequeno intervalo de ductilidade sem qualquer cedência de armadura (Fig.4.3(c)). Para responder ao comportamento dos dois últimos casos foi levantada a hipótese de que o comportamento plástico do betão à compressão, originado pela microfissuração que antecede a rotura efetiva do material, poderá ter alguma influência no início do comportamento dúctil da viga, particularmente nas vigas com taxas de armaduras moderadas ou elevadas. Desta forma, foi introduzido um novo estado indutor do início do comportamento dúctil da viga, correspondente à “cedência” do betão comprimido nas escoras. Para definir uma “extensão de cedência” do betão, recorreu-se ao Eurocódigo 2 [11].

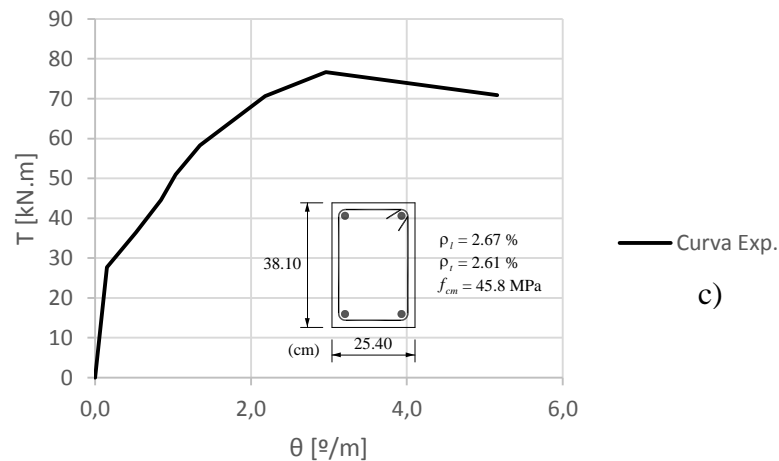
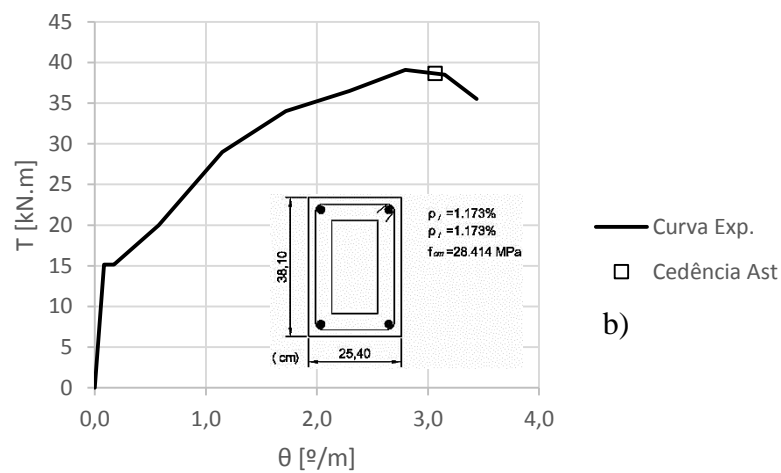
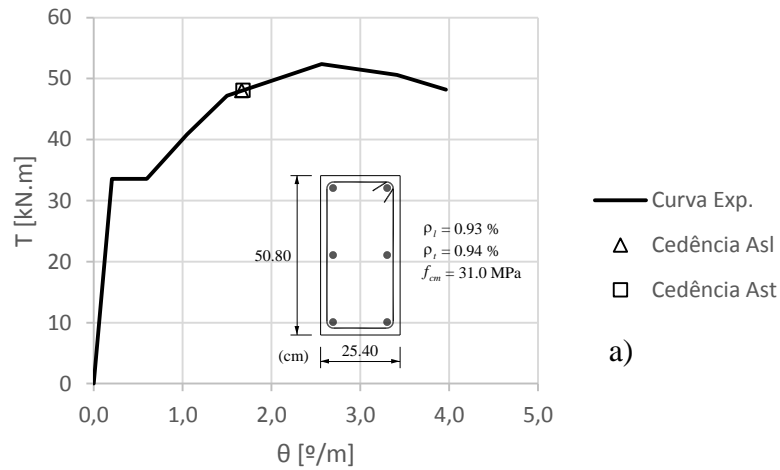


Fig.4.3 - Casos de comportamento dúctil em torção pura. Vigas de Hsu [18]: (a) Viga G7; (b) Viga D3; (c) Viga I6.

Segundo o Eurocódigo 2 [?], a relação tensão-extensão do betão comprimido para o cálculo de secções transversais é dada por um diagrama parábola-retângulo. No entanto o modelo retratado por este diagrama não é o real. A sua utilização é apenas prescrita para o cálculo

da capacidade resistente. Outro modelo que o Eurocódigo 2 permite utilizar é o diagrama bilinear de tensões-extensões ou também diagrama retangular. Este diagrama utiliza valores absolutos o que o torna mais conservativo do que o diagrama parábola-retângulo (Fig.4.3).

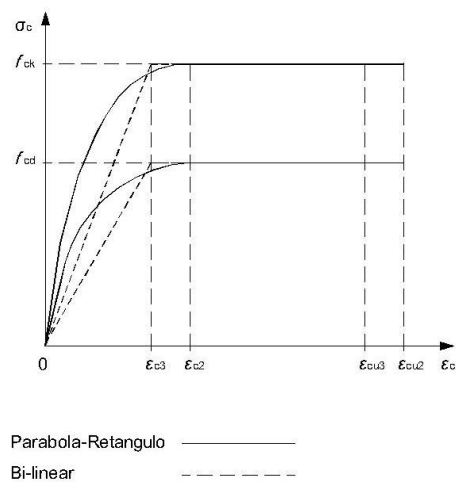
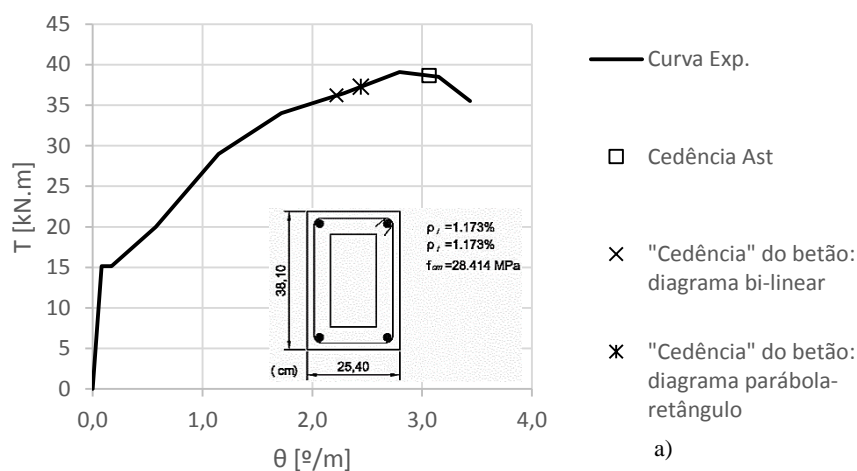


Fig.4.4 - Relação tensão-extensão do betão comprimido, segundo o EC2 [11].

Para todas as vigas de referência foram procurados os pontos de “cedência” do betão, tendo em consideração os dois diagramas, e marcados nas respetivas curvas $T - \theta$. Os resultados mostraram ser bastante satisfatórios, principalmente para os pontos calculados através do diagrama bilinear. De facto, é através deste ponto que se consegue justificar os dois casos de comportamento dúctil anteriormente referidos. Tanto para as vigas que mostravam um comportamento dúctil muito antes da cedência das armaduras como para as vigas que apresentavam um comportamento dúctil sem qualquer cedência de armadura, ambas as curvas tendem a formar um patamar horizontal muito próximo do ponto de “cedência” do betão encontrado (Fig.4.5).



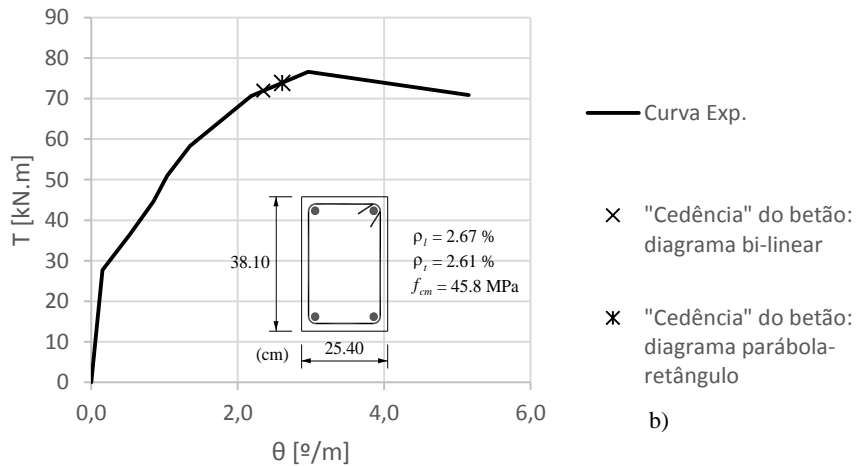
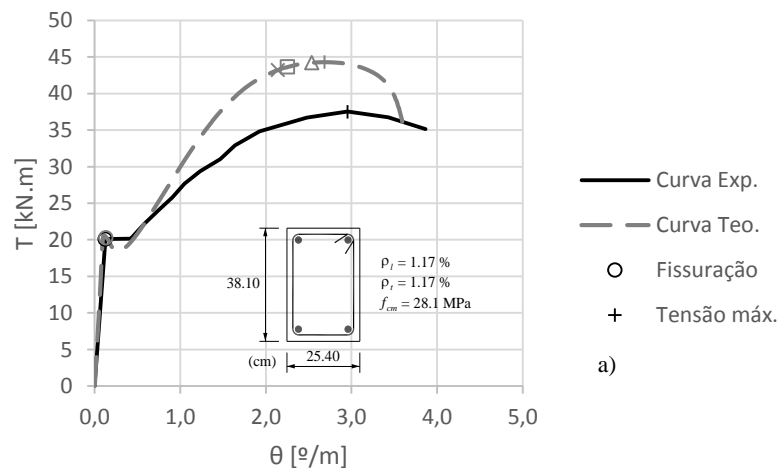


Fig.4.5 - Marcação dos pontos de “cedência” do betão nas curvas $T - \theta$. Vigas de Hsu [18]: (a) Viga D3; (b) Viga I6.

É de notar que, tal como para as armaduras, também todos os pontos de “cedência” do betão foram calculados e verificados para todas as vigas.

Obtidos todos os pontos característicos teóricos das vigas de referência, optou-se por fazer uma interpolação desses mesmos pontos para as curvas experimentais de modo a conseguir a informação em falta (vigas para as quais não se dispunha dos pontos de cedência experimentais). A interpolação dos pontos foi feita a partir de dois pontos conhecidos em ambas as curvas: o ponto de fissuração e o ponto de resistência máxima. A Fig.4.6 exemplifica este processo de interpolação para a Viga B3 de Hsu [18]. Contudo é de salientar que estes novos pontos não representam o comportamento real dos materiais nos ensaios mas sim um comportamento virtual. Tal procedimento foi considerado aceitável visto que Bernardo et al.[6] comprovaram a validade do GSVATM para simular o comportamento global de vigas sujeitas à torção.



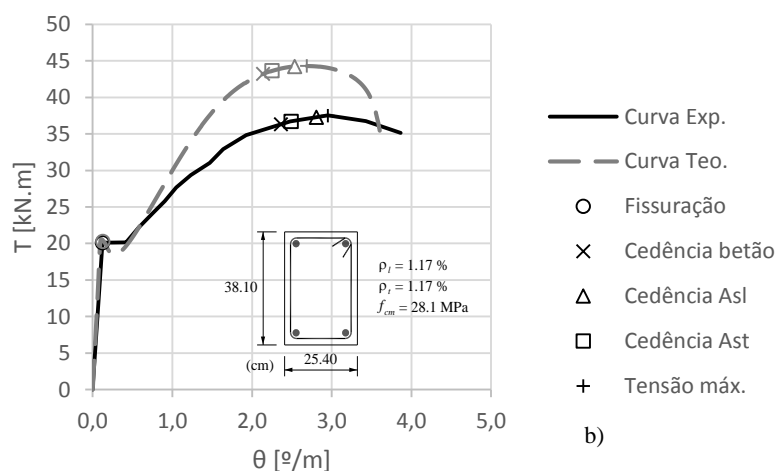


Fig.4.6 - Exemplificação do processo de interpolação dos pontos de cedência dos materiais. Viga B3 de Hsu [18].

Os Anexos II e III juntam todos os resultados obtidos das curvas $T - \theta$ de cada viga de referência, sendo estes apresentados por um conjunto de tabelas de valores e gráficos de linhas. As tabelas do Anexo II listam os pontos característicos escolhidos para análise das curvas experimentais e teóricas enquanto que o Anexo III apresenta as curvas experimentais e teóricas $T - \theta$ sobrepostas com os respetivos pontos característicos assinalados. Esta informação permitirá determinar o índice de ductilidade das vigas de referência.

4.5 Ductilidade em Torção

4.5.1 Definição do Índice de Ductilidade

Em 1990, Shin *et al.* [31] definiram que, para o caso específico da flexão, a ductilidade era melhor expressa em termos de deformação. De uma forma geral, o índice de ductilidade de deformação é definido por:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (4.12)$$

onde:

Δ_u = deformação da viga correspondente à carga última;

Δ_y = deformação da viga para a carga de cedência das armaduras.

Como mostra a equação anterior, a ductilidade é definida pela relação entre duas grandezas identificadas como deformações, uma no limite elástico e outra na rotura, sendo que esta última pode ser estabelecida convencionalmente.

Para o estudo da ductilidade em torção, e de forma semelhante ao proposto por Bernardo e Lopes [?], foi definido um índice de ductilidade de rotação em torção (μ_θ) com base na Eq.4.12. Para caracterizar a deformação global das vigas ensaiadas utilizou-se a deformação angular (rotação de torção por unidade de comprimento). Assim, o índice de ductilidade em torção é definido por:

$$\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (4.13)$$

Onde:

θ_u = rotação última;

θ_y = rotação de cedência.

A Eq.4.13 consegue quantificar o comportamento dúctil das vigas dado que o “raio de ação” nas curvas $T - \theta$ se encontra entre o ponto em que um dos materiais entra em cedência e o ponto correspondente à carga última. Tal zona de comportamento dos diagramas traduz a capacidade das vigas susterem grandes deformações inelásticas sem perda apreciável da capacidade de carga. É sabido que quanto mais extensa for essa zona, mais dúctil será a viga em estudo.

Tendo em conta a definição do índice de ductilidade à torção, surge a necessidade de identificar os pontos limites da zona de comportamento cuja extensão se pretende quantificar, nomeadamente o ponto de cedência e o ponto último.

Para definir o ponto de cedência a partir das curvas $T - \theta$ é necessário ter em conta que os materiais que compõem a viga não entram simultaneamente em cedência. Este fenómeno deve-se ao facto dos materiais não possuírem características mecânicas semelhantes (betão e aço) e ainda pode dever-se à diferença de “volumes” de armaduras (longitudinal e transversal) e/ou a desvios construtivos. Desta forma, torna-se necessário encontrar um ponto representativo da curva $T - \theta$ ao qual se possa associar o ponto de cedência da viga em geral (sem distinção da armadura ou do betão). Quando a curva $T - \theta$ evidencia uma tendência de formação de um patamar horizontal (início do comportamento dúctil) imediatamente após a cedência de um dos materiais, independentemente da localização dos restantes pontos posteriores de cedência (restantes materiais), o ponto de cedência geral da viga deverá corresponder a esse primeiro ponto. Este método de escolha é baseado essencialmente numa análise visual da curva $T - \theta$. A Fig.4.7 ilustra esquematicamente a definição do ponto de cedência numa curva comportamental tipo. Contudo, é importante frisar que nem todos os pontos de cedência registados se encontram exatamente no início da formação do patamar horizontal. Tal como foi anteriormente referido, considera-se que o betão tem influência no início da ductilidade das vigas, uma vez que é muito provável que as microfissuras do betão antecipem o início do comportamento dúctil. No entanto, estas microfissuras são difíceis de

detetar e registar com precisão. Daí a necessidade de se definir convencionalmente a “extensão de cedência” do betão, tal como anteriormente descrito.

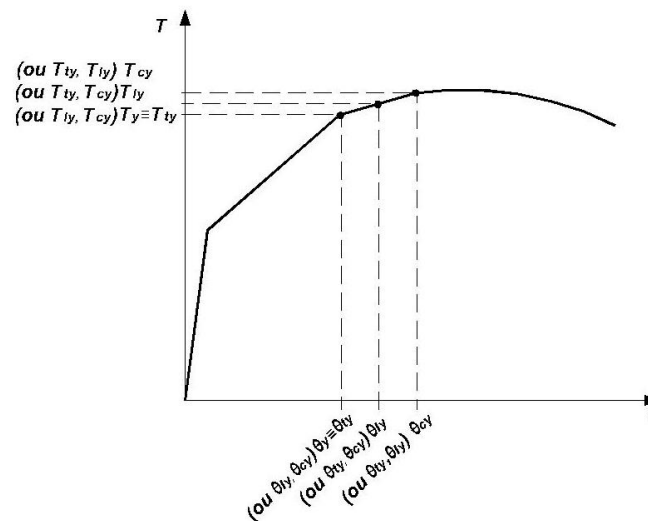


Fig.4.7 - Definição do ponto de cedência da curva $T - \theta$.

O ponto último resistente da curva $T - \theta$ define-se como sendo o ponto do diagrama a partir do qual a viga deixa de possuir capacidade de suportar cargas apreciáveis mediante grandes deformações. No entanto, dentro da comunidade científica há alguma discussão em relação à identificação desse ponto. O critério mais ou menos consensual para a definição do ponto último é o seguinte (Bernardo *et al.* [6]): no caso em que a curva de comportamento apresenta um ramo descendente na sua parte final, uma viga deixa de suportar cargas apreciáveis se a sua capacidade de carga cair abaixo de 80% da carga máxima suportada, ou seja, o ponto último de um diagrama de comportamento corresponderá a uma carga de 80% do valor máximo obtido na curva. Contudo, para as curvas de comportamento em que o ramo descendente acaba num ponto correspondente a uma carga superior a 80% da carga máxima ou para as curvas em que o ramo descendente na parte final não existe, o ponto último é obviamente atribuído ao último ponto do diagrama. A Fig. 4.8 ilustra esquematicamente a definição do ponto último numa curva comportamental tipo.

O *software Torque 2.0* define automaticamente os valores últimos das extensões do betão comprimido (ϵ_{cu}) e das armaduras longitudinal (ϵ_{lu}) e transversal (ϵ_{tu}) com valores convencionais dos mesmos geralmente aceites e definidos pelo Eurocódigo 2 (para betões de resistência normal, $\epsilon_{cu} = 0,0035$ e $\epsilon_{lu} = \epsilon_{tu} = 0,01$). Contudo, para a definição dos pontos últimos das curvas $T - \theta$ pela definição anteriormente descrita, foi necessário aumentar estes parâmetros. O objetivo foi tentar obter uma curva $T - \theta$ com um ramo descendente extenso de modo a encontrar o ponto último de acordo com o critério anteriormente apresentado. Todos os gráficos apresentados no Anexo III estão traçados até ao ponto último segundo a definição anteriormente estabelecida.

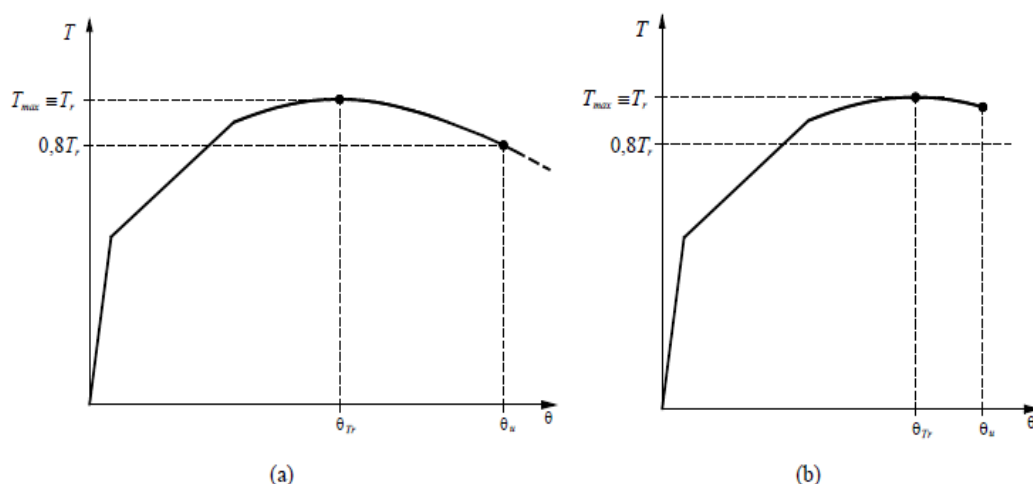


Fig.4.8 - Definição do ponto último da curva $T - \theta$ [7]. (a) Curva com ramo descendente extenso. (b) Curva com ramo descendente curto.

No Anexo IV é apresentado um quadro resumo dos valores experimentais e teóricos dos parâmetros necessário ao cálculo dos índices de ductilidade de torção, nomeadamente: as rotações de cedência (θ_y^{exp} e θ_y^{teo}) e a rotação última (θ_u^{exp} e θ_u^{teo}) bem como os valores experimentais e teóricos obtidos para os índices de ductilidade de torção (μ_θ^{exp} e μ_θ^{teo}).

É de notar que existe uma dispersão apreciável entre os índices de ductilidade teórica e experimental. O problema reside em parte na definição teórica da rotura em torção. Assume-se que uma viga atinge teoricamente a rotura quando ocorre, pelo menos, uma das seguintes situações: o betão comprimido à superfície das escoras atinge a extensão última convencional de rotura ou a armadura de torção tracionada (longitudinal e/ou transversal) atinge a extensão última convencional de rotura. Esta definição de rotura teórica, bem como a não inclusão de determinados mecanismos resistentes adicionais nos modelos teóricos, como o interbloqueamento dos agregados e o “efeito ferrolho”, conduz a traçados para a parte última das curvas $T - \theta$ (teóricas e experimentais) bastante diferentes.

É necessário salientar três casos atípicos de vigas com índices de ductilidade muito elevados. A viga B12UR2 de Koutchkali e Belarbi [24] apresenta um índice de ductilidade experimental superior (o dobro) do índice de ductilidade teórico. Este facto prende-se à aparente cedência prematura da viga no ensaio, comparativamente com o comportamento teórico da mesma. À semelhança desta viga, a viga C065a de Jeng [23] também apresenta uma cedência experimental prematura. No entanto, os índices de ductilidade (experimental e teórico) são semelhantes. Este fenómeno poderá ser justificado pelo contraste de resistência dos materiais. Esta viga possui um betão de alta resistência na ordem dos 70 MPa e uma tensão de armaduras na ordem dos 300 MPa. O facto de possuir uma baixa taxa de armadura também poderá conduzir a uma cedência muito próxima do momento torsor crítico. Finalmente a viga

B14UR1 de Koutchkali e Belarbi [24] é a viga que possui o maior índice de ductilidade experimental em estudo. Tal como a viga anterior, ela possui um grande contraste de resistência de materiais e uma baixa taxa de armadura, o que leva a uma cedência muito prematura.

As vigas anteriormente referidas, por evidenciarem um comportamento experimental atípico e não desejável, não serão consideradas nas análises seguintes deste trabalho.

4.5.2 Descrição do Método de Análise para o Estudo da Ductilidade em Torção

O objetivo do estudo da ductilidade em torção é analisar a evolução global do índice de ductilidade das vigas de referência e descobrir a influência dos vários parâmetros característicos que compõem as vigas na evolução da sua ductilidade, ou seja, a influência das variáveis de estudo consideradas. Tais variáveis escolhidas para o estudo são: a resistência do betão à compressão (f_{cm}), a taxa total de armadura de torção (ρ_{tot}), o parâmetro que mede a relação entre o “volume” de armaduras ($m_{b,ef}$), o fator de escala (h/b) e o tipo de secção (secção cheia e vazada). Para tal, foi necessário agrupar as vigas de referência consoante a variável considerada e mantendo, sempre que possível, as restantes quatro variáveis de estudo iguais ou semelhantes. Dado o grande número de vigas em estudo, a análise da ductilidade foi feita por várias fases.

Em primeiro lugar, foi criado um quadro com todas as vigas de referência divididas por tipo de secção (cheia e vazada). Neste quadro são apresentadas as principais características geométricas e mecânicas das secções, nomeadamente: a largura (x), a altura (y) e a espessura (t) da secção no caso das secções vazadas, o fator de escala (h/b), as taxas de armadura longitudinal (ρ_l), transversal (ρ_t) e total (ρ_{tot}) e a relação entre os volumes das mesmas ($m_{b,ef}$). Também são apresentadas as principais características mecânicas dos materiais, designadamente: a resistência média à compressão do betão (f_{cm}) e a tensão média de cedência da armadura longitudinal (f_{lym}) e transversal (f_{tym}). O quadro ainda apresenta os valores experimentais e teóricos obtidos dos índices de ductilidade de torção (μ_{θ}^{exp} e μ_{θ}^{teo}). Este quadro serviu de base para o agrupamento e análise das vigas.

A partir do quadro anterior foram criados quatro novos quadros, um para cada variável de estudo (f_{cm} , ρ_{tot} , $m_{b,ef}$ e h/b), onde as vigas foram agrupadas em séries de valores iguais ou semelhantes da variável em análise. Seguidamente, essas séries foram analisadas individualmente com o objetivo de agrupar vigas com as características o mais semelhantes

possíveis, ou seja, cujas restantes variáveis de estudo tivessem valores muito próximos entre vigas.. Todas as vigas que não se inserissem nas séries em análise eram excluídas do estudo.

Após o agrupamento de vigas, foram criados vários gráficos de dispersão para visualizar as tendências da ductilidade em função de cada variável em estudo. Os resultados obtidos são analisados e discutidos nas secções seguintes deste capítulo. No final são apresentadas conclusões.

4.5.3 Influência da Resistência do Betão na Ductilidade em Torção

O estudo da influência da resistência do betão à compressão (f_{cm}) na ductilidade em torção passa por três análises: análise segundo séries de taxas de armadura de torção (ρ_{tor}) iguais ou semelhantes, análise segundo séries de equilíbrios de “volume” de armaduras ($m_{b,ef}$) iguais ou semelhantes e análise segundo séries de fatores de escala (h/b) iguais. Estas análises são ainda feitas separadamente para cada tipo de secção (cheia e vazada). Em cada análise é apresentado um quadro com o agrupamento de vigas em estudo e as suas características, dois gráficos de dispersão com os valores experimentais e teóricos dos índices de ductilidade calculados e, no final, são feitas algumas observações e conclusões retiradas a partir dos resultados apresentados. É de notar que, nos quadros de agrupamento de vigas e em cada série, as vigas encontram-se ordenadas por ordem crescente da resistência do betão para facilitar a análise. Nas tabelas e gráficos de dispersão foram identificadas todas as vigas que apresentam curvas experimentais aparentemente incompletas e/ou com um comportamento atípico. Esta identificação tem como objetivo facilitar a identificação de possíveis vigas que fujam à tendência geral observada.

4.5.3.1 *Influência da resistência do betão na ductilidade em torção segundo séries com taxas de armadura semelhantes*

O Quadro 4.2 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com taxas de armaduras iguais ou semelhantes e resistências do betão variáveis. As Fig. 4.9 e 4.10 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da resistência do betão na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.2 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com taxas de armadura semelhantes e resistências do betão variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
VS9 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.33	0.35	0.68	0.94	17.6	570.9	570.9	1.26	1.42
VS2-VQ2 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.35	0.37	0.72	0.94	19.0	432.6	432.6	1.52	1.77
J1 [18]	25.4	38.1	-	1.50	0.53	0.54	1.07	0.94	14.3	327.6	346.2	2.19	1.41
J2 [18]	25.4	38.1	-	1.50	0.83	0.83	1.66	0.93	14.6	320.0	340.7	1.98	1.50
B5UR1 [24]	20.3	30.5	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.94	39.6	386.0	373.0	2.82	2.25
B7UR1 [24]	20.3	30.5	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.88	64.6	386.0	399.0	5.06	3.10
B9UR1 [24]	20.3	30.5	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.94	75.0	386.0	373.0	1.60	3.53
B12UR1 [24]	20.3	30.5	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.88	80.6	386.0	399.0	3.48	3.57
B3 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	1.17	2.35	1.02	28.1	327.6	320.0	1.63	1.69
I3 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	1.17	2.35	1.03	44.8	343.4	333.8	3.09	2.38
B12UR3 [24]	20.3	30.5	-	1.50	1.06	1.04	2.10	1.00	72.9	379.5	386.0	3.14	2.94
B12UR5 [24]	20.3	30.5	-	1.50	1.29	1.41	2.71	0.90	76.7	380.0	386.0	2.51	2.47
J4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.97	16.8	324.1	331.7	1.66	1.62
B4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.98	29.2	320.0	323.4	1.81	1.77
I4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.96	45.0	315.2	326.2	1.67	1.97
B5 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.11	2.13	4.24	1.02	30.6	332.4	321.4	1.79	1.83
I5 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.11	2.13	4.24	0.94	45.0	310.3	325.5	2.32	1.93
B6 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.67	2.61	5.27	1.05	28.8	331.7	322.8	1.44	1.83
I6 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.67	2.61	5.27	1.01	45.8	325.5	329.0	2.19	1.99

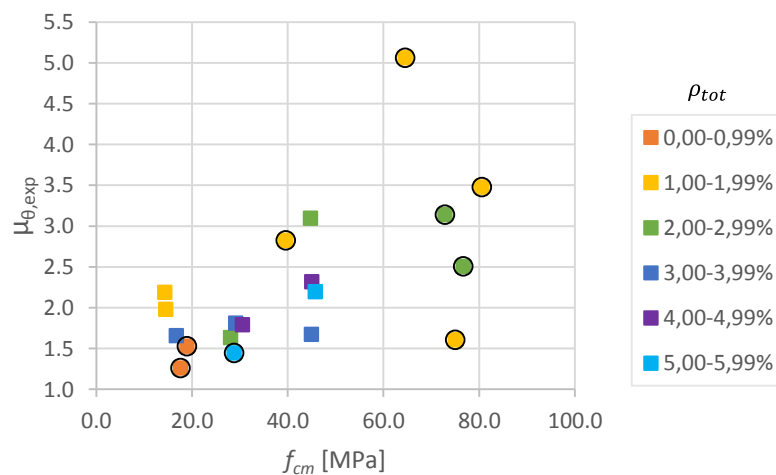


Fig.4.9 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).

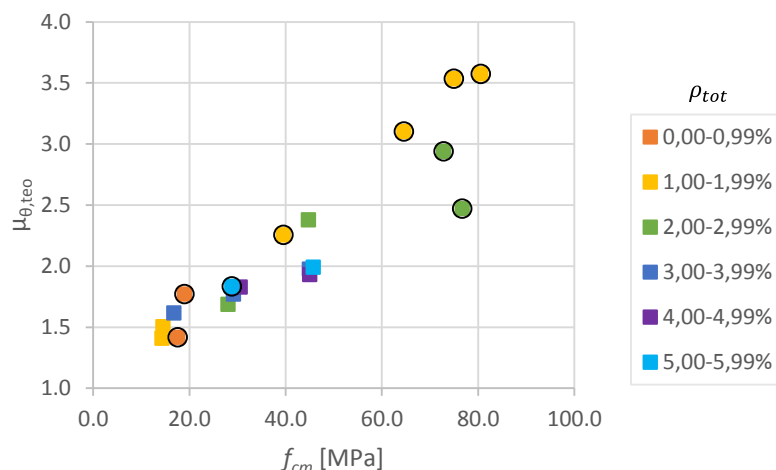


Fig.4.10 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).

No geral, quer em termos experimentais como teóricos, para uma dada gama de taxa de armadura, a ductilidade aumenta com o aumento da resistência do betão. Experimentalmente, observa-se uma dispersão maior dos pontos.

Contudo, experimentalmente, as vigas da série $\rho_{tot} = 1,00-1,99\%$ apresentam um comportamento diferente das restantes séries. Esta série deve ser encarada com alguma reserva pois as curvas experimentais $T - \theta$ das suas vigas apresentam pontos de cedência muito precoces. Estes pontos foram calculados por interpolação dos pontos de cedência teóricos e não representam o comportamento real da viga.

Para um determinado valor de resistência do betão não é possível definir uma relação coerente entre a ductilidade e a taxa de armadura.

O Quadro 4.3 apresenta vigas de secção vazada agrupadas em séries com taxas de armaduras iguais ou semelhantes e resistências do betão variáveis. As Fig. 4.11 e 4.12 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da resistência do betão na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.3 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com taxas de armadura semelhantes e resistências do betão variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
A3 [7]	60.0	60.0	10.9	1.00	0.50	0.49	1.00	0.96	46.2	672.4	714.8	1.47	1.68
A2 [7]	60.0	60.0	10.7	1.00	0.39	0.37	0.76	1.00	47.3	672.4	695.9	2.22	1.99
A1 [7]	60.0	60.0	9.8	1.00	0.18	0.19	0.37	1.05	48.4	695.9	636.7	3.45	3.68
B2 [7]	60.0	60.0	10.8	1.00	0.41	0.40	0.80	0.99	69.8	672.4	695.9	1.73	2.44
C1 [7]	60.0	60.0	9.7	1.00	0.18	0.19	0.37	1.04	91.7	695.9	636.7	1.80	5.09
C2 [7]	60.0	60.0	10.0	1.00	0.39	0.37	0.76	1.01	94.8	672.4	695.9	1.55	2.97
A5 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	0.85	0.83	1.68	1.11	53.1	723.9	672.4	1.45	1.77
A4 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	0.66	0.65	1.31	1.03	54.8	723.9	714.8	1.53	1.82
B3 [7]	60.0	60.0	10.9	1.00	0.66	0.67	1.33	1.00	77.8	723.9	714.8	1.39	1.76
B4 [7]	60.0	60.0	11.2	1.00	0.89	0.89	1.78	1.09	79.8	723.9	672.4	1.32	1.67
C3 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.66	0.63	1.29	1.06	91.6	723.9	714.8	1.19	1.73
C4 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.85	0.86	1.71	1.07	91.4	723.9	672.4	1.21	1.58
B5 [7]	60.0	60.0	11.7	1.00	1.12	1.09	2.20	1.11	76.4	723.9	672.4	1.36	1.73
C6 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	1.34	1.34	2.68	1.08	87.5	723.9	672.4	1.30	1.71
C5 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	1.02	1.05	2.07	1.05	96.7	723.9	672.4	1.20	1.57

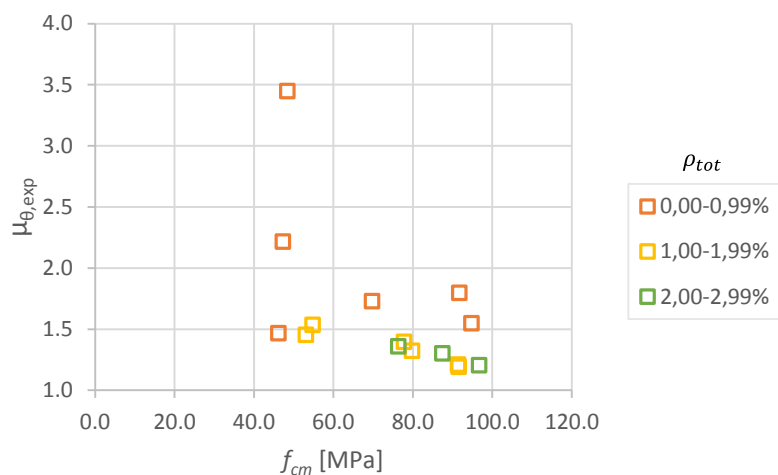


Fig.4.11 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores experimentais - secção vazada).

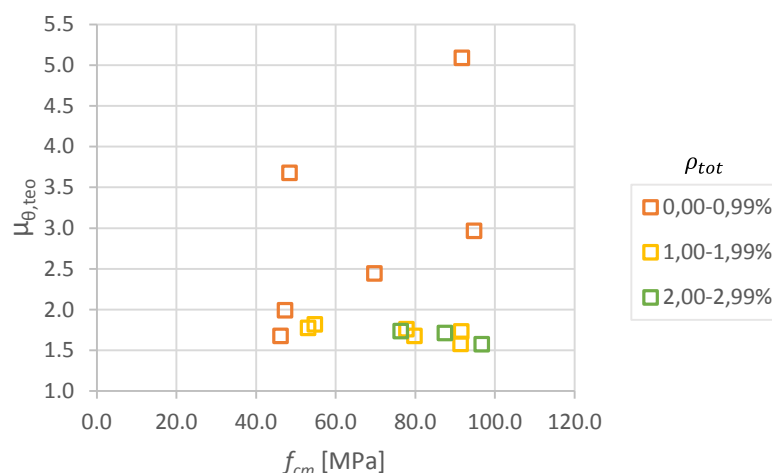


Fig.4.12 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores teóricos - secção vazada).

No geral e ao contrário do observado para as secções cheias, para uma dada gama de a taxa de armadura, a ductilidade tende a diminuir com o aumento da resistência do betão. Para o gráfico teórico, os pontos correspondentes à série com taxa de armadura dentro da gama 0,00-0,99% constituem uma exceção. É observado que, experimentalmente, para maiores resistências do betão, a influência da resistência do betão na ductilidade aparenta ser mais pequena.

Teoricamente, e como foi dito anteriormente, a influência da resistência do betão na ductilidade é oposta nos dois tipos de secção. Uma possível explicação para este fenómeno é precisamente a presença ou ausência de núcleo central. No estado limite último, é a presença de núcleo central que permite a redistribuição transversal das tensões para o interior da secção. Desta forma, ao contrário das secções cheias e à medida que a resistência do betão aumenta em vigas de seção vazada, estas não sofrem um processo gradual de degradação para estados de tensão mais elevados e compatíveis com a maior resistência do betão apresentando, assim, uma baixa influência na ductilidade.

A série $\rho_{tot} = 0,00-0,99\%$ possui uma maior ductilidade que as restantes séries devido ao facto da cedência das armaduras ser atingida mais rapidamente (para menores momentos torsores), comparativamente às séries com maiores taxas de armaduras que sofrem uma rotura tendencialmente mais frágil para maiores momentos torsores.

Para um determinado valor de resistência do betão, a ductilidade aparenta diminuir com o aumento da taxa de armadura. É possível evidenciar este comportamento graças às vigas de Bernardo [6] que estão incorporadas no estudo. Este autor concebeu o ensaio das suas vigas especificamente para estudar a ductilidade. Ao contrário das vigas de secção cheia, estas

vigas apresentam resultados mais fidedignos que os restantes autores originando, assim, uma menor dispersão dos resultados e uma tendência mais clara.

4.5.3.2 *Influência da resistência do betão na ductilidade em torção segundo séries com equilíbrios de armadura semelhante*

O Quadro 4.4 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com equilíbrio de armaduras iguais ou semelhantes e resistências do betão variáveis. As Fig. 4.13 e 4.14 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da resistência do betão na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.4 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e resistências do betão variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
VU2 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.48	0.68	1.16	0.70	19.5	441.4	441.4	1.14	1.52
VM1 [26]	29.4	16.0	-	1.84	0.64	0.66	1.30	0.75	39.1	442.4	568.9	1.37	2.49
B7UR1 [24]	20.3	30.5	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.88	64.6	386.0	399.0	5.06	3.10
B12UR1 [24]	20.3	30.5	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.88	80.6	386.0	399.0	3.48	3.57
N-14-10 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.97	1.38	2.36	0.98	33.5	500.0	360.0	2.27	1.77
N-12-12 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.18	1.22	2.40	0.90	35.5	410.0	440.0	3.11	1.78
H-14-10 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.97	1.38	2.36	0.98	68.4	500.0	360.0	3.80	2.37
H-12-12 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.18	1.22	2.40	0.90	78.5	410.0	440.0	3.40	2.39
B3 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	1.17	2.35	1.02	28.1	327.6	320.0	1.63	1.69
I3 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	1.17	2.35	1.03	44.8	343.4	333.8	3.09	2.38
N-20-20 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.95	2.01	3.96	1.23	35.5	560.0	440.0	2.53	1.84
H-20-20 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.95	2.01	3.96	1.23	78.5	560.0	440.0	1.75	1.87
M1 [18]	25.4	38.1	-	1.50	0.83	0.55	1.38	1.39	29.9	326.2	353.1	3.12	2.58
M2 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	0.78	1.96	1.38	30.6	329.0	357.2	1.81	2.00
N-12-16 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.62	1.22	2.84	1.58	35.5	520.0	440.0	2.78	1.79
H-12-16 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.62	1.22	2.84	1.58	78.5	520.0	440.0	2.38	1.98
N-07-10 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.97	0.68	1.65	1.71	33.5	500.0	420.0	2.59	1.91
H-07-10 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.97	0.68	1.65	1.71	68.4	500.0	420.0	2.56	2.91
N-06-12 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.18	0.61	1.79	1.81	35.5	410.0	440.0	2.92	1.95
H-06-12 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.18	0.61	1.79	1.81	78.5	410.0	440.0	4.41	3.20
N-07-16 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.62	0.68	2.30	2.86	33.5	500.0	420.0	1.74	1.75
H-07-16 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.62	0.68	2.30	2.86	68.4	500.0	420.0	2.46	2.73

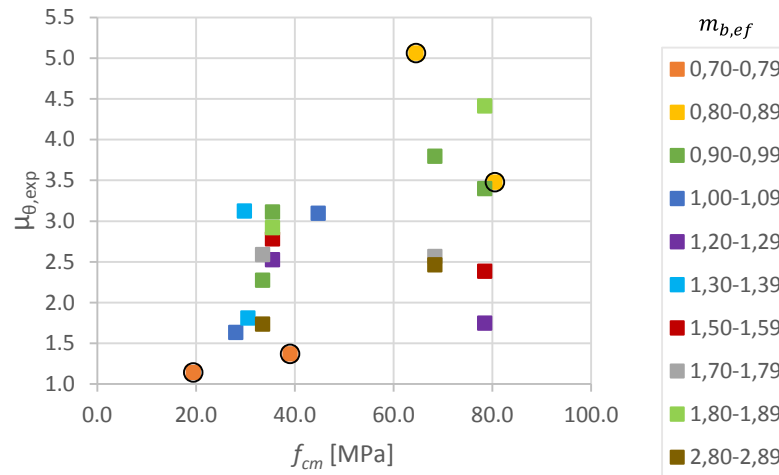


Fig.4.13 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).

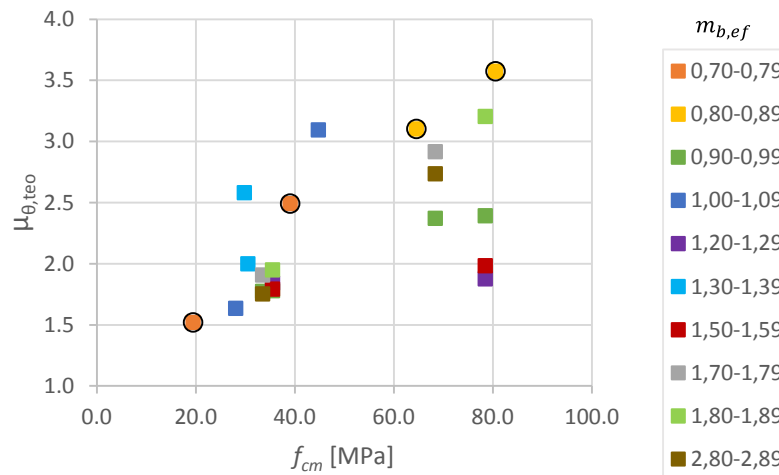


Fig.4.14 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).

Teoricamente e em geral, para uma dada gama de equilíbrio das armaduras, a ductilidade tende a aumentar com o aumento da resistência do betão. Em termos experimentais, a tendência anteriormente observada não é tão clara. Enquanto que para algumas gamas de equilíbrio das armaduras a ductilidade tende a aumentar com o aumento da resistência do betão, para outras gamas a ductilidade tende a diminuir. Uma possível explicação para esta observação poderá residir na maior dispersão dos resultados obtidos em termos experimentais.

Para uma dada resistência do betão não é possível distinguir uma relação coerente entre o equilíbrio de “volume” de armaduras e a ductilidade em torção.

O Quadro 4.5 apresenta vigas de secção vazada agrupadas em séries com equilíbrio de armaduras iguais ou semelhantes e resistências do betão variáveis. As Fig. 4.15 e 4.16 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da resistência do betão na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.5 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e resistências do betão variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tyl} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
A3 [7]	60.0	60.0	10.9	1.00	0.50	0.49	1.00	0.96	46.2	672.4	714.8	1.47	1.68
B2 [7]	60.0	60.0	10.8	1.00	0.41	0.40	0.80	0.99	69.8	672.4	695.9	1.73	2.44
A2 [7]	60.0	60.0	10.7	1.00	0.39	0.37	0.76	1.00	47.3	672.4	695.9	2.22	1.99
A1 [7]	60.0	60.0	9.8	1.00	0.18	0.19	0.37	1.05	48.4	695.9	636.7	3.45	3.68
C1 [7]	60.0	60.0	9.7	1.00	0.18	0.19	0.37	1.04	91.7	695.9	636.7	1.80	5.09
C2 [7]	60.0	60.0	10.0	1.00	0.39	0.37	0.76	1.01	94.8	672.4	695.9	1.55	2.97

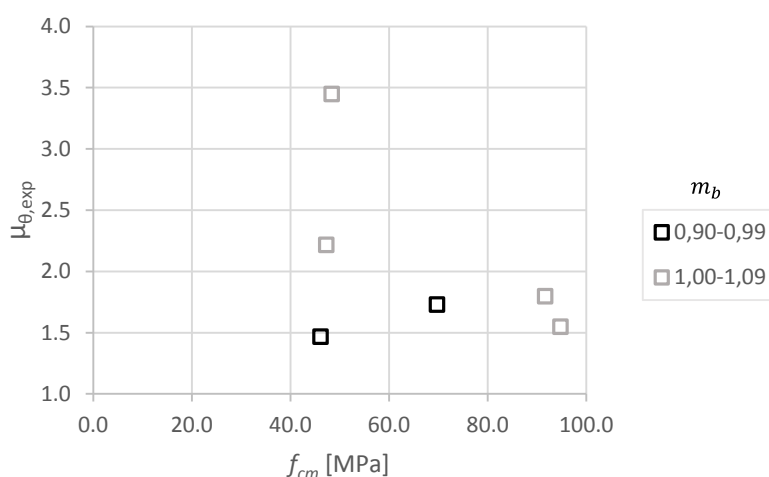


Fig.4.15 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção vazada).

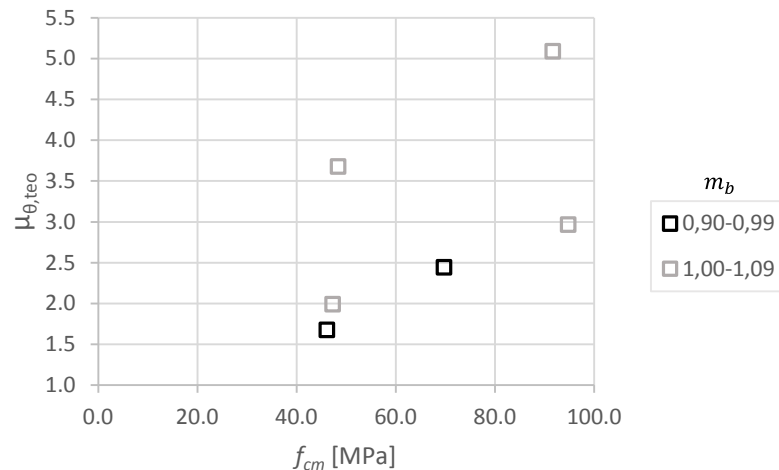


Fig.4.16 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção vazada).

Com apenas duas séries e com poucas vigas não é possível definir uma tendência clara da evolução da ductilidade em função da resistência do betão, para uma dada gama em termos de equilíbrio das armaduras. Por exemplo, para a série $m_{b,ef} = 0,90-0,99$, enquanto que teoricamente a ductilidade aparenta aumentar com a resistência do betão, concordando com a série $m_{b,ef} = 1,00-1,09$, experimentalmente observa-se o contrário, contrariando a série $m_{b,ef} = 1,00-1,09$.

Para uma dada resistência do betão observa-se que a ductilidade é maior quando a armadura se encontra equilibrada.

4.5.3.3 *Influência da resistência do betão na ductilidade em torção segundo séries com fatores de escala iguais*

O Quadro 4.6 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com fatores de escala iguais e resistências do betão variáveis. As Fig. 4.17 e 4.18 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da resistência do betão na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.6 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com fatores de escala iguais e resistências do betão variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
N-14-10 [15]	35.00	50.00	-	1.43	0.97	1.38	2.36	0.98	33.5	500.0	360.0	2.27	1.77
N-12-12 [15]	35.00	50.00	-	1.43	1.18	1.22	2.40	0.90	35.5	410.0	440.0	3.11	1.78
H-14-10 [15]	35.00	50.00	-	1.43	0.97	1.38	2.36	0.98	68.4	500.0	360.0	3.80	2.37
H-12-12 [15]	35.00	50.00	-	1.43	1.18	1.22	2.40	0.90	78.5	410.0	440.0	3.40	2.39
VS10-VB1 [26]	44.00	24.00	-	1.83	0.66	0.70	1.36	0.94	19.0	570.9	570.9	1.14	1.55
VS3 [26]	44.00	24.00	-	1.83	0.52	0.55	1.07	0.94	19.5	432.6	432.6	1.08	1.48
VB2 [26]	44.00	24.00	-	1.83	0.66	0.71	1.37	0.94	26.4	541.4	541.4	1.22	1.63
VM2 [26]	44.00	24.00	-	1.83	0.63	0.65	1.27	0.96	36.1	431.6	436.5	1.57	2.18
VB3 [26]	44.00	24.00	-	1.83	0.66	0.71	1.37	0.94	39.1	541.4	541.4	1.40	1.70
VM3 [26]	58.70	32.00	-	1.83	0.68	0.65	1.33	1.10	40.0	461.0	442.4	2.02	2.29
VB4 [26]	44.00	24.00	-	1.83	0.66	0.71	1.37	0.94	49.8	541.4	541.4	1.45	1.81
B5UR1 [24]	20.30	30.50	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.94	39.6	386.0	373.0	2.82	2.25
B7UR1 [24]	20.30	30.50	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.88	64.6	386.0	399.0	5.06	3.10
B9UR1 [24]	20.30	30.50	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.94	75.0	386.0	373.0	1.60	3.53
B12UR1 [24]	20.30	30.50	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.88	80.6	386.0	399.0	3.48	3.57
G3 [18]	25.40	50.80	-	2.00	0.88	0.88	1.76	1.03	26.8	338.6	327.6	1.91	1.89
N3 [18]	15.24	30.48	-	2.00	0.92	0.90	1.82	1.02	27.3	351.7	351.7	2.71	1.69
N1a [18]	15.24	30.48	-	2.00	0.61	0.62	1.23	0.98	28.7	346.2	344.8	4.21	2.56
N1 [18]	15.24	30.48	-	2.00	0.61	0.62	1.23	1.01	29.5	352.4	341.4	4.29	2.64
G7 [18]	25.40	50.80	-	2.00	0.93	0.94	1.87	0.98	31.0	319.3	322.8	2.38	2.17

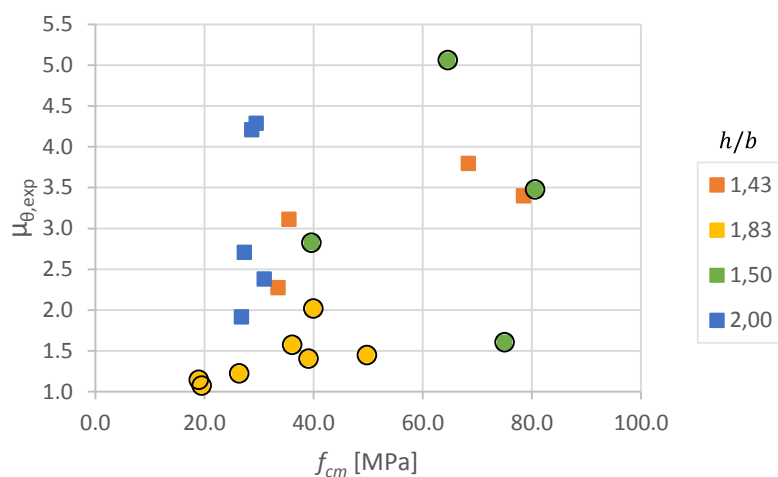


Fig.4.17 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores experimentais - secção cheia).

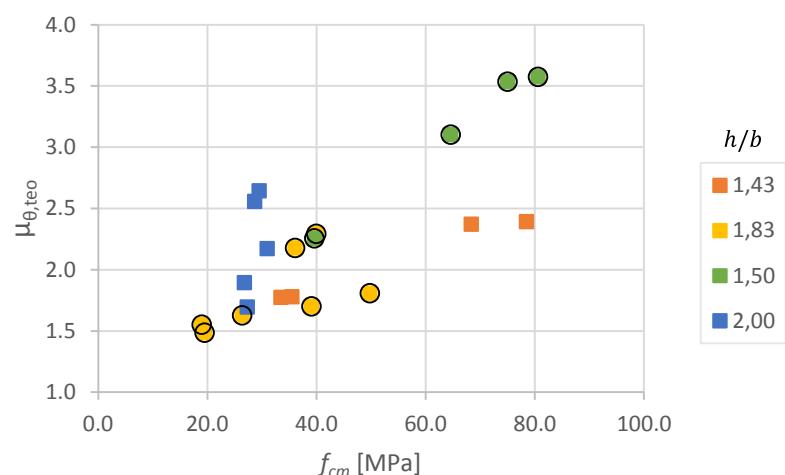


Fig.4.18 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores teóricos - secção cheia).

Tanto experimentalmente como teoricamente, para todas as séries de vigas com exceção da série $h/b = 2,00$ (para a qual a resistência do betão praticamente não varia), a ductilidade aparenta aumentar com a resistência do betão. Porém existem alguns casos que não apresentam uma tendência certa. Em termos experimentais, a série $h/b = 1,50$ apresenta uma grande dispersão. Esta série deve ser encarada com alguma reserva pois as curvas experimentais $T - \theta$ das suas vigas apresentam pontos de cedência muito precoces. Estes pontos foram calculados por interpolação dos pontos de cedência teóricos e não representam o comportamento real da viga.

Em geral, para uma dada resistência do betão, a ductilidade aparenta aumentar com o aumento do fator de escala. Tal poderá ser explicado pelo facto de que o aumento da área da secção, que permite uma maior possibilidade para a redistribuição transversal das tensões, compensa o incremento das áreas de armaduras de torção (incremento este, necessário para manter a taxa de armadura a um valor constante).

O Quadro 4.7 apresenta vigas de secção vazada agrupadas em séries com fatores de escala iguais e resistências do betão variáveis. As Fig. 4.19 e 4.20 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da resistência do betão na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.7 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com fatores de escala iguais e resistências do betão variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tyl} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
A5 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	0.85	0.83	1.68	1.11	53.1	723.9	672.4	1.45	1.77
A4 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	0.66	0.65	1.31	1.03	54.8	723.9	714.8	1.53	1.82
B3 [7]	60.0	60.0	10.9	1.00	0.66	0.67	1.33	1.00	77.8	723.9	714.8	1.39	1.76
B4 [7]	60.0	60.0	11.2	1.00	0.89	0.89	1.78	1.09	79.8	723.9	672.4	1.32	1.67
C4 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.85	0.86	1.71	1.07	91.4	723.9	672.4	1.21	1.58
C3 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.66	0.63	1.29	1.06	91.6	723.9	714.8	1.19	1.73
A120a [23]	50.2	71.9	18.4	1.43	0.55	0.46	1.99	1.46	27.6	464.0	380.0	2.53	2.41
B110a [23]	49.8	71.0	15.5	1.43	0.57	0.53	1.99	1.31	48.1	453.0	369.0	2.66	3.97

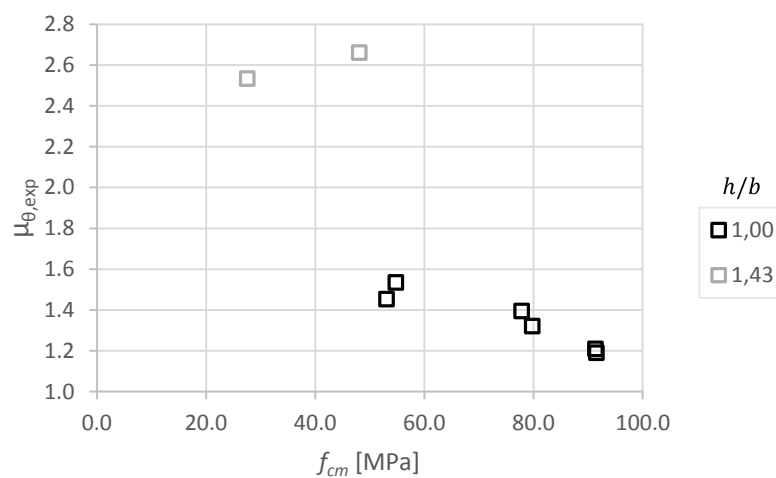


Fig.4.19 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries de fatores de escala iguais (valores experimentais - secção vazada).

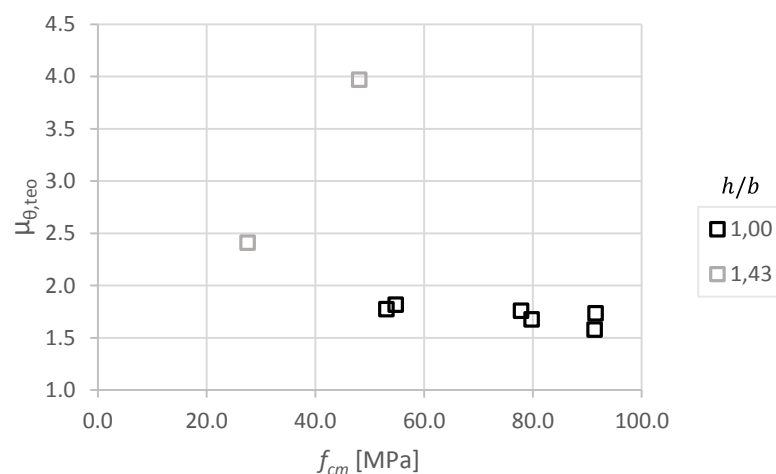


Fig.4.20 - Influência da resistência do betão na ductilidade em torção, em séries de fatores de escala iguais (valores teóricos - secção vazada).

Com apenas duas séries não é possível definir uma tendência. No entanto, para vigas de betão de resistência mais baixa a ductilidade aparenta aumentar com a resistência do betão enquanto que, para vigas de betão de alta resistência a ductilidade diminui ligeiramente. O betão aparenta assim ter uma menor influência na ductilidade à medida que a resistência aumenta, designadamente na gama de alta resistência.

Também é possível observar que, para uma resistência do betão de cerca de 50 MPa, a ductilidade aparenta aumentar com o aumento do fator de escala, à semelhança do observado para as secções cheias.

4.5.4 Influência da Taxa de Armadura na Ductilidade em Torção

Tal como na secção anterior, o estudo da influência da taxa total de armadura (ρ_{tot}) na ductilidade em torção passa por três análises: análise segundo séries de resistência do betão à compressão (f_{cm}) iguais ou semelhantes, análise segundo séries de equilíbrio de “volume” de armaduras ($m_{b,ef}$) iguais ou semelhantes e análise segundo séries de fatores de escala (h/b) iguais. Estas análises são ainda feitas separadamente para cada tipo de secção (cheia e vazada). Em cada análise é apresentado um quadro com o agrupamento de vigas em estudo e suas características, dois gráficos de dispersão com os valores experimentais e teóricos dos índices de ductilidade calculados e, no final, são feitas algumas observações e conclusões retiradas a partir dos resultados apresentados. É de notar que, nos quadros de agrupamento de vigas e em cada série, as vigas encontram-se ordenadas por ordem crescente de taxa de armadura para facilitar a análise. Nas tabelas e gráficos de dispersão foram identificadas todas as vigas que apresentam curvas experimentais aparentemente incompletas e/ou com um comportamento atípico. Esta identificação tem como objetivo facilitar a identificação de possíveis vigas que fujam à tendência geral observada.

4.5.4.1 *Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção segundo séries com resistência do betão semelhantes*

O Quadro 4.8 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com resistências do betão iguais ou semelhantes e taxas de armadura variáveis. As Fig. 4.21 e 4.22 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.8 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com resistência do betão semelhantes e taxas de armaduras variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
VS9 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.33	0.35	0.68	0.94	17.6	570.9	570.9	1.26	1.42
VS2-VQ2 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.35	0.37	0.72	0.94	19.0	432.6	432.6	1.52	1.77
VS3 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.52	0.55	1.07	0.94	19.5	432.6	432.6	1.08	1.48
VS10-VB1 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.66	0.70	1.36	0.94	19.0	570.9	570.9	1.14	1.55
VS4-VQ5 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.69	0.74	1.43	0.94	19.0	432.6	432.6	1.15	1.55
N1a [18]	15.2	30.5	-	2.00	0.61	0.62	1.23	0.98	28.7	346.2	344.8	4.21	2.56
G3 [18]	25.4	50.8	-	2.00	0.88	0.88	1.76	1.03	26.8	338.6	327.6	1.91	1.89
N3 [18]	15.2	30.5	-	2.00	0.92	0.90	1.82	1.02	27.3	351.7	351.7	2.71	1.69
N2a [18]	15.2	30.5	-	2.00	1.11	1.10	2.22	0.93	28.4	333.1	360.7	2.71	1.69
G4 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.20	1.20	2.40	1.01	28.3	325.5	321.4	1.55	1.70
G8 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.32	1.31	2.63	0.99	28.3	322.1	329.0	1.96	1.72
N4 [18]	15.2	30.5	-	2.00	1.42	1.42	2.84	0.96	27.3	340.9	355.9	2.26	1.74
G5 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.58	1.60	3.18	1.00	26.9	331.0	327.6	1.78	1.76
A2 [27]	25.4	25.4	-	1.00	0.80	1.08	1.88	0.99	38.2	380.0	285.0	1.96	2.78
A3 [27]	25.4	25.4	-	1.00	1.24	1.22	2.46	1.00	39.4	352.4	360.0	3.17	1.81
A4 [27]	25.4	25.4	-	1.00	1.76	1.69	3.45	1.02	39.2	351.0	360.0	1.46	1.86
I3 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	1.17	2.35	1.03	44.8	343.4	333.8	3.09	2.38
I4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.96	45.0	315.2	326.2	1.67	1.97
I5 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.11	2.13	4.24	0.94	45.0	310.3	325.5	2.32	1.93
I6 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.67	2.61	5.27	1.01	45.8	325.5	329.0	2.19	1.99
B9UR1 [24]	20.3	30.5	-	1.50	0.83	0.92	1.75	0.94	75.0	386.0	373.0	1.60	3.53
B12UR3 [24]	20.3	30.5	-	1.50	1.06	1.04	2.10	1.00	72.9	379.5	386.0	3.14	2.94
B12UR5 [24]	20.3	30.5	-	1.50	1.29	1.41	2.71	0.90	76.7	380.0	386.0	2.51	2.47

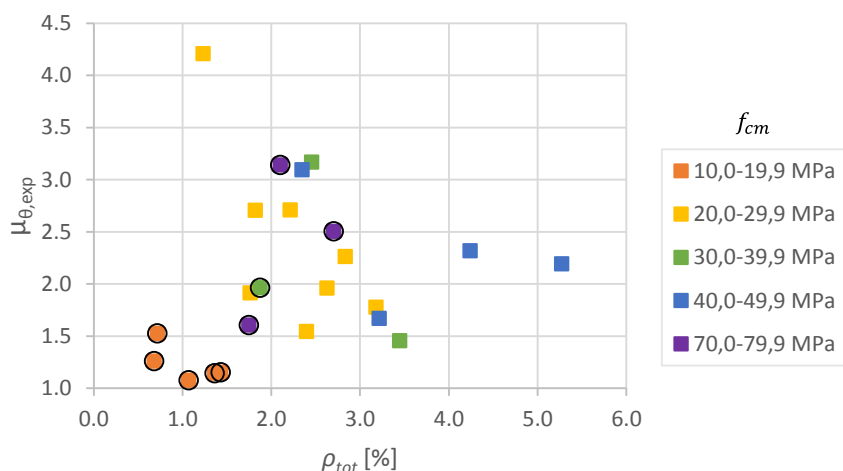


Fig.4.21 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores experimentais - secção cheia).

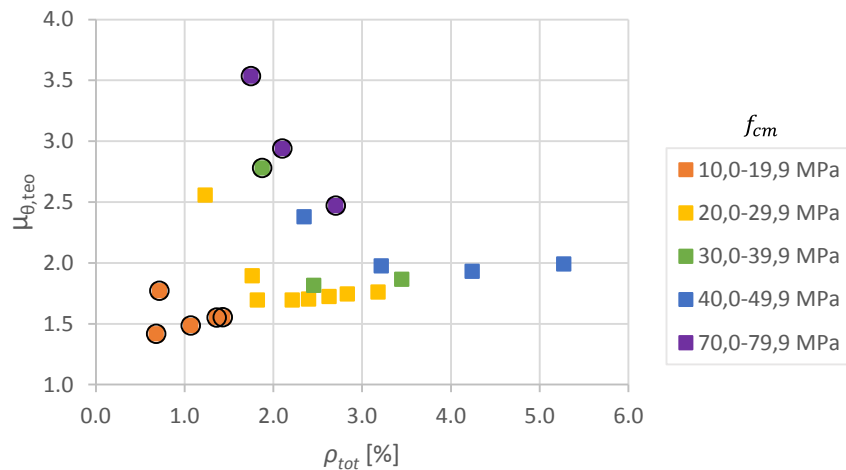


Fig.4.22 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores teóricos - secção cheia).

Em termos teóricos, para uma dada gama de resistência à compressão, a ductilidade diminui acentuadamente com o aumento da taxa de armadura de torção, até uma determinada percentagem de armadura. Depois dessa percentagem, a influência da armadura torna-se bastante menos acentuada. A ductilidade aparenta tender a estabilizar num valor não nulo. Em termos experimentais, os desvios observados são maiores, no entanto a tendência geral confirma a observada teoricamente.

O valor limite da taxa de armadura a partir da qual a sua influência na ductilidade se torna menos acentuada aparenta depender da classe de resistência do betão. Teoricamente, tal valor aparenta rondar a gama dos 2,0-3,0%. Para valores mais elevados de resistência do betão, a referida taxa limite aparenta também aumentar.

Nos resultados apresentados, a série $f_{cm} = 10,0 - 19,9 \text{ MPa}$ apresenta uma ductilidade muito inferior às restantes, originando um desvio apreciável dos respetivos pontos nos gráficos. As curvas $T - \theta$ destas vigas aparentam mostrar que o registo dos ensaios foi interrompido imediatamente após a rotura das vigas, uma vez que tais curvas não apresentam qualquer ramo descendente. Por isso, os resultados destas vigas devem ser encarados com muita reserva.

Para uma dada taxa de armadura, os resultados teóricos mostram que a ductilidade aumenta com o aumento da resistência do betão. A dispersão dos resultados experimentais não permite observar claramente essa tendência.

O Quadro 4.9 apresenta vigas de secção vazada agrupadas em séries com resistências do betão iguais ou semelhantes e taxas de armadura variáveis. As Fig. 4.23 e 4.24 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.9 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com taxas de armadura semelhantes e resistência do betão variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tyl} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
VH1 [26]	32.4	32.4	8.0	1.00	0.33	0.33	1.33	0.99	17.2	447.3	447.3	1.21	1.41
VH2 [26]	32.4	32.4	8.0	1.00	0.66	0.67	1.66	0.99	17.2	447.3	447.3	1.94	1.55
A1 [7]	60.0	60.0	9.8	1.00	0.18	0.19	0.37	1.05	48.4	695.9	636.7	3.45	3.68
A2 [7]	60.0	60.0	10.7	1.00	0.39	0.37	0.76	1.00	47.3	672.4	695.9	2.22	1.99
A3 [7]	60.0	60.0	10.9	1.00	0.50	0.49	1.00	0.96	46.2	672.4	714.8	1.47	1.68
B3 [7]	60.0	60.0	10.9	1.00	0.66	0.67	1.33	1.00	77.8	723.9	714.8	1.39	1.76
B4 [7]	60.0	60.0	11.2	1.00	0.89	0.89	1.78	1.09	79.8	723.9	672.4	1.32	1.67
C1 [7]	60.0	60.0	9.7	1.00	0.18	0.19	0.37	1.04	91.7	695.9	636.7	1.80	5.09
C2 [7]	60.0	60.0	10.0	1.00	0.39	0.37	0.76	1.01	94.8	672.4	695.9	1.55	2.97
C3 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.66	0.63	1.29	1.06	91.6	723.9	714.8	1.19	1.73
C4 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.85	0.86	1.71	1.07	91.4	723.9	672.4	1.21	1.58
C5 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	1.02	1.05	2.07	1.05	96.7	723.9	672.4	1.20	1.57

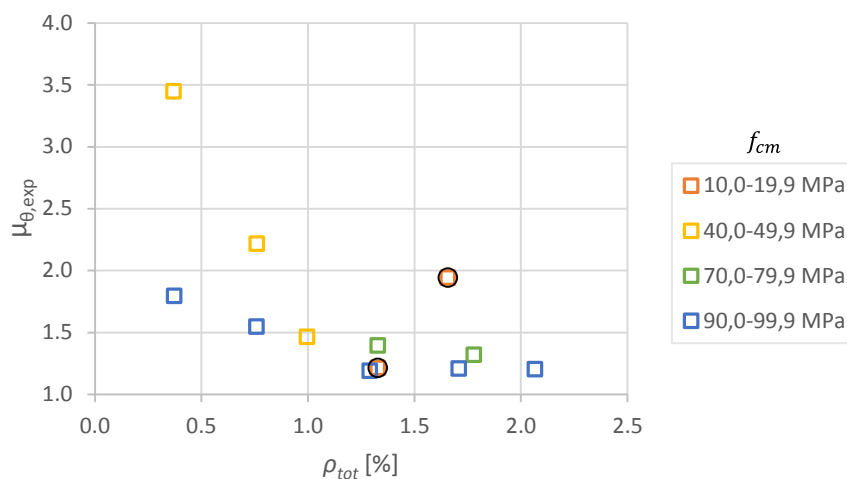


Fig.4.23 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores experimentais - secção vazada).

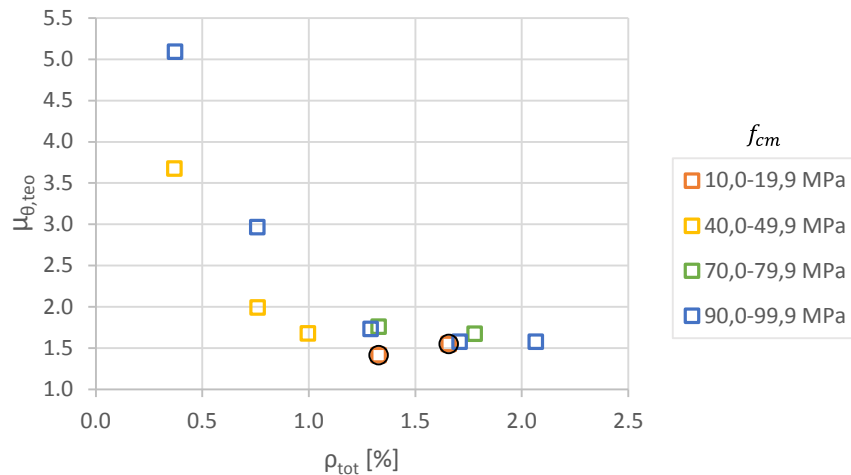


Fig.4.24 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores teóricos - secção vazada).

A tendência da ductilidade sob a influência da taxa de armadura em vigas de secção vazada é semelhante à tendência da ductilidade em vigas de secção cheia. Para uma dada gama de resistência do betão, esta tende a diminuir apreciavelmente com o aumento da taxa de armadura. A partir de uma determinada percentagem de armadura, a ductilidade aparenta novamente a estabilizar num valor relativamente pequeno mas não nulo.

O valor de taxa de armadura a partir do qual a ductilidade tende a estabilizar aparenta rondar a gama dos 1,0-1,5%, inferior ao observado para as secções cheias. Tal como para as vigas de secção cheia, o ponto de estabilização da ductilidade também aparenta depender da classe de resistência do betão. Os resultados teóricos mostram que, para valores mais elevados da resistência do betão, a taxa limite de armadura é ligeiramente maior.

Para uma dada taxa de armadura inferior à anteriormente referida taxa, os resultados teóricos mostram que a ductilidade aumenta com o aumento da resistência do betão. Os resultados experimentais mostram uma tendência contrária. Para taxas de armaduras superiores à taxa limite a tendência anteriormente referida não é notória.

Os resultados das vigas da série $f_{cm} = 10,0 - 19,9 \text{ MPa}$ apresentam os mesmos problemas anteriormente repostados para as secções cheias.

4.5.4.2 Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção segundo séries com equilíbrios de armadura semelhantes

O Quadro 4.10 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com equilíbrios de armadura iguais ou semelhantes e taxas de armadura variáveis. As Fig. 4.25 e 4.26 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.10 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e taxas de armaduras variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
N1a [18]	15.24	30.48	-	2.00	0.611	0.623	1.234	0.985	28.69	346.21	344.83	4.208	2.557
G7 [18]	25.40	50.80	-	2.00	0.930	0.939	1.869	0.979	30.97	319.31	322.76	2.381	2.172
N2a [18]	15.24	30.48	-	2.00	1.111	1.104	2.215	0.929	28.41	333.10	360.69	2.708	1.693
N2 [18]	15.24	30.48	-	2.00	1.111	1.129	2.240	0.964	30.41	331.03	337.93	2.101	1.703
G8 [18]	25.40	50.80	-	2.00	1.320	1.309	2.629	0.987	28.35	322.07	328.97	1.960	1.722
N4 [18]	15.24	30.48	-	2.00	1.417	1.420	2.836	0.956	27.31	340.92	355.86	2.263	1.744
G5 [18]	25.40	50.80	-	2.00	1.580	1.600	3.180	0.998	26.90	331.03	327.59	1.775	1.760
B3 [18]	25.40	38.10	-	1.50	1.173	1.173	2.347	1.024	28.07	327.59	320.00	1.633	1.685
B5 [18]	25.40	38.10	-	1.50	2.107	2.133	4.240	1.022	30.55	332.41	321.38	1.791	1.828
B6 [18]	25.40	38.10	-	1.50	2.667	2.607	5.274	1.051	28.83	331.72	322.76	1.445	1.834
M1 [18]	25.40	38.10	-	1.50	0.827	0.549	1.376	1.390	29.86	326.21	353.10	3.120	2.580
M2 [18]	25.40	38.10	-	1.50	1.173	0.782	1.956	1.381	30.55	328.97	357.24	1.808	1.998
M3 [18]	25.40	38.10	-	1.50	1.600	1.067	2.667	1.481	26.76	322.07	326.21	1.554	1.701
M4 [18]	25.40	38.10	-	1.50	2.107	1.422	3.529	1.444	26.55	318.62	326.90	1.842	1.743
M5 [18]	25.40	38.10	-	1.50	2.667	1.805	4.472	1.495	28.00	335.17	331.03	1.711	1.786

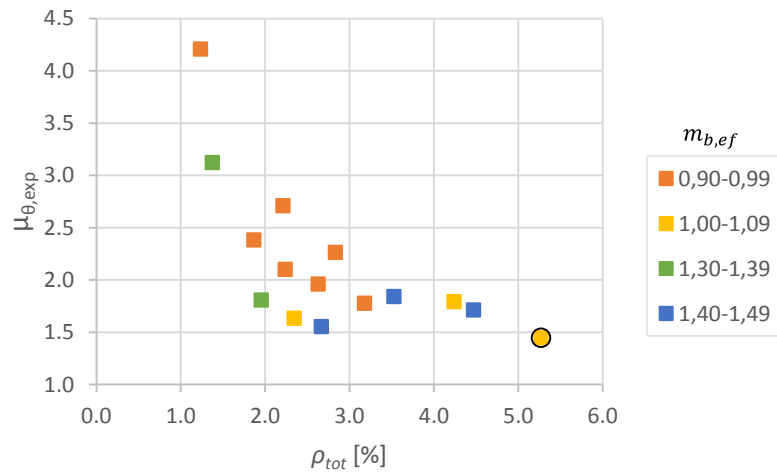


Fig.4.25 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).

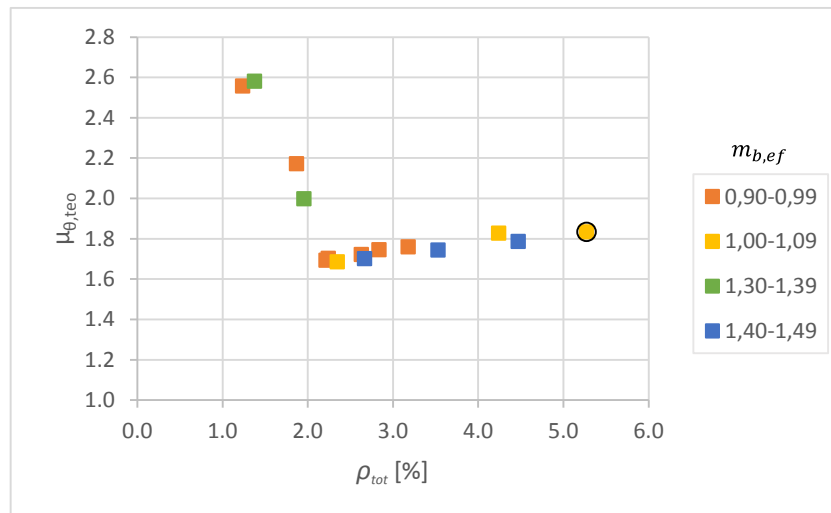


Fig.4.26 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).

Novamente e em geral, a ductilidade diminui acentuadamente com o aumento da taxa de armadura até a uma percentagem compreendida entre $\rho_{tot} = 2,0\%$ e $\rho_{tot} = 3,0\%$. Depois desse intervalo a ductilidade aparenta estabilizar. A tendência anterior é observada para algumas das gamas de equilíbrio de armaduras. Para as restantes, embora o número de pontos não seja suficiente para ilustrar claramente essa tendência, acredita-se que tal também se verifica.

Para uma dada taxa de armadura, aparentemente não existe uma influência notória do equilíbrio de “volume” de armaduras na ductilidade em torção, apesar da maior dispersão observada nos resultados experimentais.

O Quadro 4.11 apresenta vigas de secção vazada agrupadas em séries com equilíbrios de armadura iguais ou semelhantes e taxas de armadura variáveis. As Fig. 4.27 e 4.28 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.11 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e taxas de armadura variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
VH1 [26]	32.4	32.4	8.0	1.00	0.33	0.33	1.33	0.99	17.2	447.3	447.3	1.21	1.41
VH2 [26]	32.4	32.4	8.0	1.00	0.66	0.67	1.66	0.99	17.2	447.3	447.3	1.94	1.55
C1 [7]	60.0	60.0	9.7	1.00	0.18	0.19	0.37	1.04	91.7	695.9	636.7	1.80	5.09
C2 [7]	60.0	60.0	10.0	1.00	0.39	0.37	0.76	1.01	94.8	672.4	695.9	1.55	2.97
C3 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.66	0.63	1.29	1.06	91.6	723.9	714.8	1.19	1.73
C4 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.85	0.86	1.71	1.07	91.4	723.9	672.4	1.21	1.58
C5 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	1.02	1.05	2.07	1.05	96.7	723.9	672.4	1.20	1.57

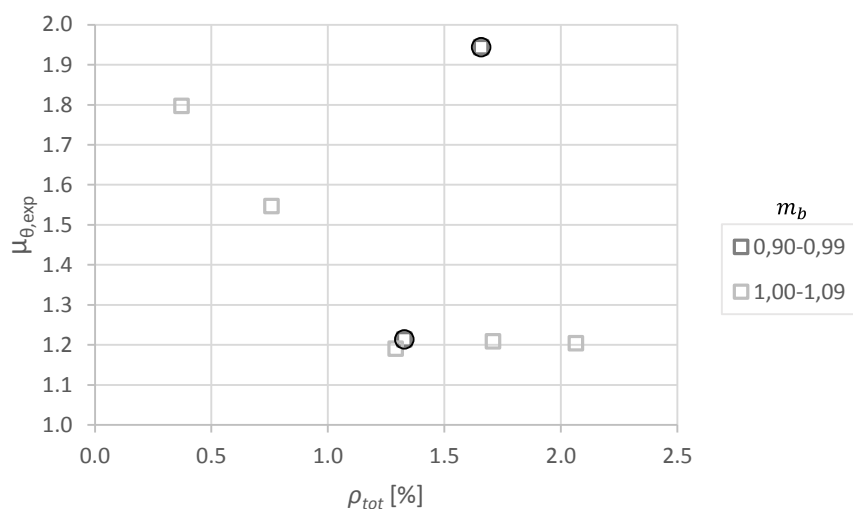


Fig.4.27 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção vazada).

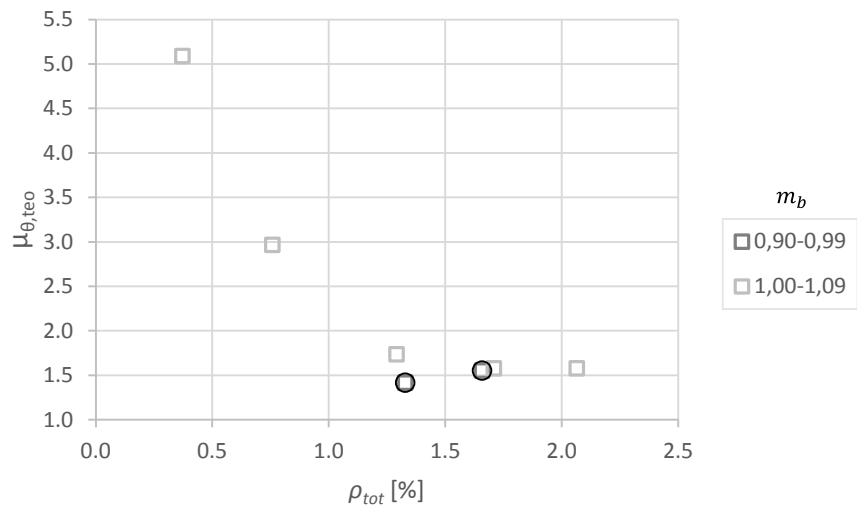


Fig.4.28 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção vazada).

Com apenas duas séries não é possível definir uma tendência generalizada. Porém, a série $m_b = 1,00-1,09$ segue uma tendência análoga à observada aquando do estudo anterior das vigas com secção vazada. Ou seja, a ductilidade diminui acentuadamente com o aumento da taxa de armadura até a uma percentagem compreendida entre $\rho_{tot} = 1,0\%$ e $\rho_{tot} = 1,5\%$, gama esta inferior à observada para as vigas com secção cheia. A partir desta gama para a taxa de armadura, a ductilidade tende a estabilizar.

As vigas da série $m_{b,ef} = 0,90-0,99$, por possuírem um traçado incompleto da curva $T - \theta$ e não mostrarem a ductilidade real das mesmas, não devem ser tidas em conta na análise anteriormente realizada. Por isso, não é possível distinguir uma relação entre o equilíbrio de “volume” de armaduras e a ductilidade em torção.

4.5.4.3 Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção segundo séries com fatores de escala iguais

O Quadro 4.12 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com fatores de escala iguais e taxas de armadura variáveis. As Fig. 4.29 e 4.30 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.12 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com fatores de escala iguais e taxas de armadura variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
C4 [18]	25.4	25.4	-	1.00	1.76	1.76	3.52	1.03	27.2	336.6	327.6	1.61	1.76
C5 [18]	25.4	25.4	-	1.00	2.40	2.37	4.77	1.01	27.2	328.3	329.0	2.22	1.80
C6 [18]	25.4	25.4	-	1.00	3.16	3.20	6.36	0.95	27.6	315.9	327.6	1.65	1.85
B3 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	1.17	2.35	1.02	28.1	327.6	320.0	1.63	1.69
B4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.98	29.2	320.0	323.4	1.81	1.77
B5 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.11	2.13	4.24	1.02	30.6	332.4	321.4	1.79	1.83
B6 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.67	2.61	5.27	1.05	28.8	331.7	322.8	1.44	1.83
VS9 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.33	0.35	0.68	0.94	17.6	570.9	570.9	1.26	1.42
VS2-VQ2 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.35	0.37	0.72	0.94	19.0	432.6	432.6	1.52	1.77
VS3 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.52	0.55	1.07	0.94	19.5	432.6	432.6	1.08	1.48
VS10-VB1 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.66	0.70	1.36	0.94	19.0	570.9	570.9	1.14	1.55
VS4-VQ5 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.69	0.74	1.43	0.94	19.0	432.6	432.6	1.15	1.55
N1 [18]	15.2	30.5	-	2.00	0.61	0.62	1.23	1.01	29.5	352.4	341.4	4.29	2.64
G3 [18]	25.4	50.8	-	2.00	0.88	0.88	1.76	1.03	26.8	338.6	327.6	1.91	1.89
N3 [18]	15.2	30.5	-	2.00	0.92	0.90	1.82	1.02	27.3	351.7	351.7	2.71	1.69
G7 [18]	25.4	50.8	-	2.00	0.93	0.94	1.87	0.98	31.0	319.3	322.8	2.38	2.17
N2a [18]	15.2	30.5	-	2.00	1.11	1.10	2.22	0.93	28.4	333.1	360.7	2.71	1.69
N2 [18]	15.2	30.5	-	2.00	1.11	1.13	2.24	0.96	30.4	331.0	337.9	2.10	1.70
G4 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.20	1.20	2.40	1.01	28.3	325.5	321.4	1.55	1.70
G8 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.32	1.31	2.63	0.99	28.3	322.1	329.0	1.96	1.72
N4 [18]	15.2	30.5	-	2.00	1.42	1.42	2.84	0.96	27.3	340.9	355.9	2.26	1.74
G5 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.58	1.60	3.18	1.00	26.9	331.0	327.6	1.78	1.76
K2 [18]	15.2	49.5	-	3.25	1.03	1.03	2.05	0.99	30.6	335.9	337.9	1.54	1.86
K3 [18]	15.2	49.5	-	3.25	1.59	1.58	3.17	0.99	29.0	315.9	320.7	1.73	1.80
K4 [18]	15.2	49.5	-	3.25	2.26	2.28	4.54	1.00	28.6	344.1	340.0	2.21	1.85

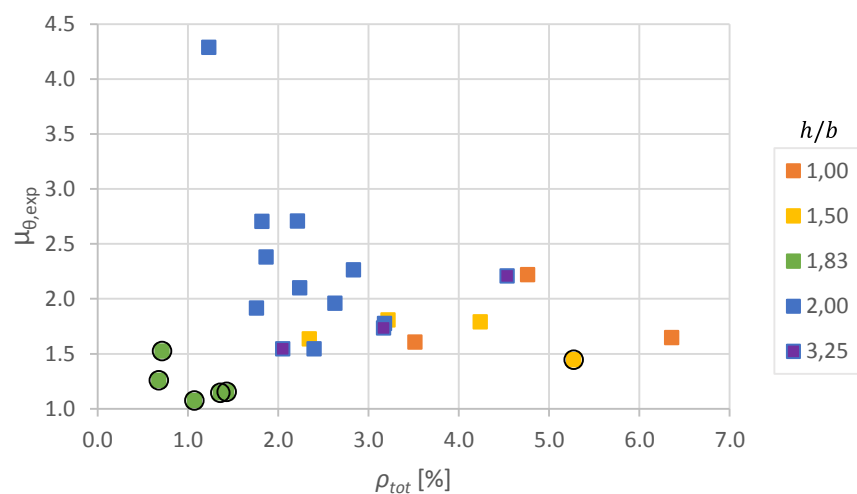


Fig.4.29 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores experimentais - secção cheia).

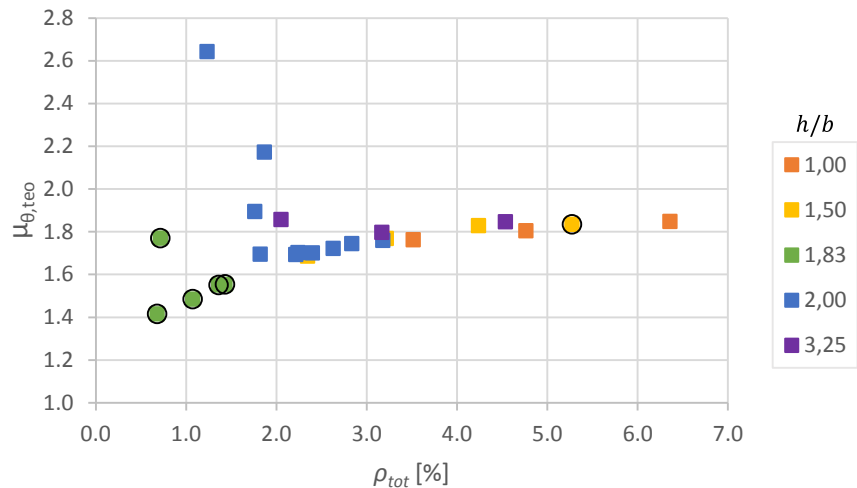


Fig.4.30- Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores teóricos - secção cheia).

Mais uma vez, para as séries com fatores de escala iguais, no geral a ductilidade diminui acentuadamente com o aumento da taxa de armadura até uma determinada percentagem de aproximadamente 2,0% a 3,0% seguido de uma aparente estabilização da ductilidade. Visto que existem séries com fator de escala iguais com reduzido número de pontos ao longo de um intervalo limitado para a taxa de armadura, não é possível assegurar que a tendência anteriormente observada se generalize independentemente a esta variável de estudo. No entanto, acredita-se que tal deverá acontecer.

É também observado que a série $h/b = 1,83$ possui uma ductilidade inferior às restantes séries. O caso das vigas associadas a esta série já foi comentado anteriormente.

Finalmente, para uma dada taxa de armadura, o fator de escala possui aparentemente pouca influência na ductilidade em torção.

O Quadro 4.13 apresenta vigas de secção vazada agrupadas em séries com fatores de escala iguais e taxas de armadura variáveis. As Fig. 4.31 e 4.32 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.13 - Agrupamento de vigas de secção vazada em séries com fatores de escala iguais e taxas de armadura variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
A1 [7]	60.00	60.00	9.81	1.00	0.181	0.189	0.370	1.049	48.43	695.90	636.66	3.446	3.676
A2 [7]	60.00	60.00	10.67	1.00	0.387	0.373	0.761	1.003	47.34	672.42	695.90	2.216	1.990
A3 [7]	60.00	60.00	10.90	1.00	0.503	0.494	0.996	0.958	46.15	672.42	714.83	1.465	1.677
D3 [18]	25.40	38.10	6.35	1.50	1.173	1.173	2.673	1.025	28.41	341.38	333.10	1.547	1.768
D4 [18]	25.40	38.10	6.35	1.50	1.600	1.618	3.100	0.981	30.62	330.35	333.10	1.437	1.766

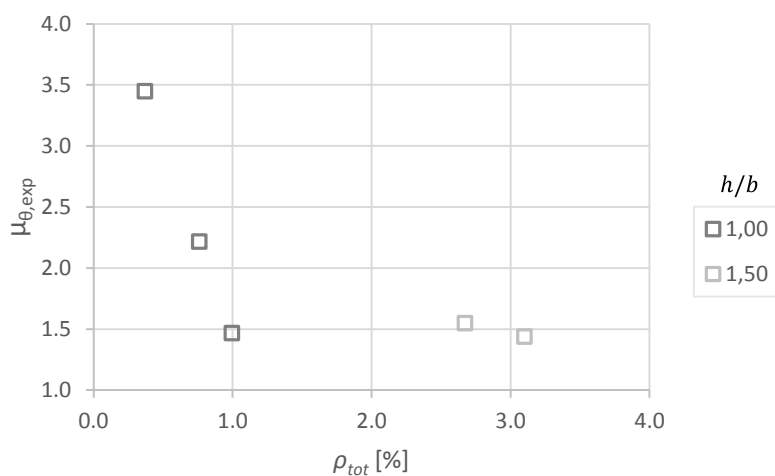


Fig.4.31 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores experimentais - secção vazada).

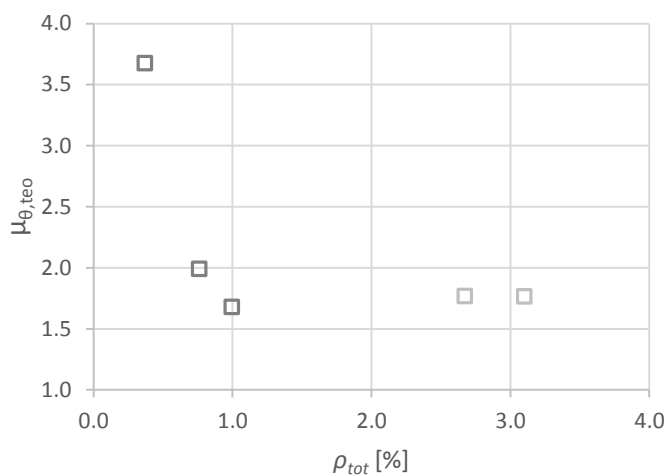


Fig.4.32 - Influência da taxa de armadura na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores teóricos - secção vazada).

Novamente, com apenas duas séries e poucos pontos não é possível definir uma tendência clara nem uma relação entre o fator de escala e a ductilidade. Porém, acredita-se que a tendência geral será análoga à observada para as vigas com secção cheia.

4.5.5 Influência do Equilíbrio de "Volume" de Armaduras na Ductilidade em Torção

Novamente, o estudo do equilíbrio de "volume" de armaduras ($m_{b,ef}$) na ductilidade em torção passa por três análises: análise segundo séries de resistência do betão à compressão (f_{cm}) iguais ou semelhantes, análise segundo séries de taxas de armaduras (ρ_{tot}) iguais ou semelhantes e análise segundo séries de fatores de escala (h/b) iguais. Como não se conseguiu reunir um número suficiente de vigas de secção vazada, estas análises só se realizaram para vigas de secção cheia. Em cada análise é apresentado um quadro com o agrupamento de vigas em estudo e suas características, dois gráficos de dispersão com os valores experimentais e teóricos dos índices de ductilidade calculados e, no final, são feitas algumas observações e conclusões retiradas a partir dos resultados apresentados. É de notar que, nos quadros de agrupamento de vigas e em cada série, as vigas encontram-se ordenadas por ordem crescente de equilíbrio de volumes de armadura para facilitar a análise. Nas tabelas e gráficos de dispersão foram identificadas todas as vigas que apresentam curvas experimentais aparentemente incompletas e/ou com um comportamento atípico. Esta identificação tem como objetivo facilitar a identificação de possíveis vigas que fujam à tendência geral observada.

4.5.5.1 Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção segundo séries de resistência do betão semelhantes

O Quadro 4.14 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com resistências do betão iguais ou semelhantes e valores de equilíbrio de armaduras variáveis. As Fig. 4.33 e 4.34 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.14 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com resistência do betão semelhantes e valores de equilíbrio de armaduras variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
VU1 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.32	0.68	1.00	0.47	19.5	441.4	441.4	1.59	1.50
VS2-VQ2 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.35	0.37	0.72	0.94	19.0	432.6	432.6	1.52	1.77
VU4 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.64	0.34	0.98	1.88	18.5	441.4	441.4	1.32	1.62
B7 [18]	25.4	38.1	-	1.50	0.53	1.17	1.71	0.46	26.0	320.0	318.6	2.63	2.28
M1 [18]	25.4	38.1	-	1.50	0.83	0.55	1.38	1.39	29.9	326.2	353.1	3.12	2.58
B9 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	0.54	1.71	2.03	28.8	319.3	342.8	2.51	2.50
N-06-06 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.69	0.61	1.29	1.13	35.5	440.0	440.0	2.85	2.05
N-07-10 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.97	0.68	1.65	1.71	33.5	500.0	420.0	2.59	1.91
N-06-12 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.18	0.61	1.79	1.81	35.5	410.0	440.0	2.92	1.95
VB4 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.66	0.71	1.37	0.94	49.8	541.4	541.4	1.45	1.81
VM3 [26]	58.7	32.0	-	1.83	0.68	0.65	1.33	1.10	40.0	461.0	442.4	2.02	2.29
H-14-10 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.97	1.38	2.36	0.98	68.4	500.0	360.0	3.80	2.37
H-07-16 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.62	0.68	2.30	2.86	68.4	500.0	420.0	2.46	2.73
B12UR5 [24]	20.3	30.5	-	1.50	1.29	1.41	2.71	0.90	76.7	380.0	386.0	2.51	2.47
B12UR3 [24]	20.3	30.5	-	1.50	1.06	1.04	2.10	1.00	72.9	379.5	386.0	3.14	2.94

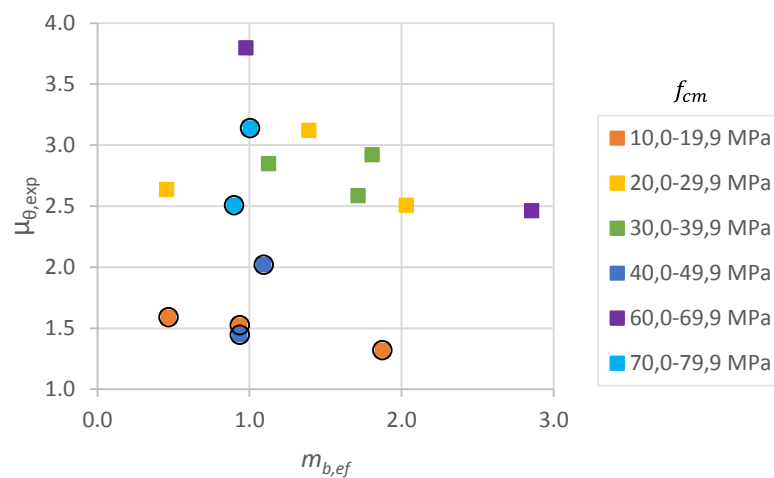


Fig.4.33 - Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores experimentais - secção cheia).

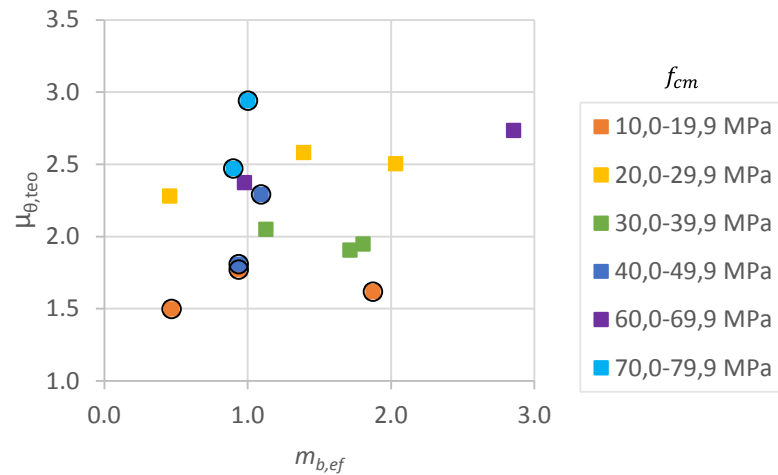


Fig.4.34 - Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores teóricos - secção cheia).

Quer em termos experimentais como teóricos, não se consegue definir uma tendência clara da evolução da ductilidade sob a influência do equilíbrio de “volume” das armaduras, para uma determinada gama da resistência do betão. Mesmo eliminando as vigas das séries $f_{cm} = 10,0-19,9$, $f_{cm} = 40,0-49,9$ e $f_{cm} = 70,0-79,9$, que se destacam por possuírem traçados incompletos das curvas $T - \theta$ ou por possuírem pontos de cedência precoces, a tendência continua a não ser clara.

Para um dado valor de equilíbrio de armadura, também não é possível definir uma relação coerente entre a resistência do betão e a ductilidade em torção.

4.5.5.2 Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção segundo séries com taxas de armadura semelhantes

O Quadro 4.15 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com taxa de armaduras iguais ou semelhantes e valores de equilíbrio de armaduras variáveis. As Fig. 4.35 e 4.36 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.15 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com taxas de armadura semelhantes e valores de equilíbrio de armadura variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
VU1 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.32	0.68	1.00	0.47	19.5	441.4	441.4	1.59	1.50
VS2-VQ2 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.35	0.37	0.72	0.94	19.0	432.6	432.6	1.52	1.77
VU4 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.64	0.34	0.98	1.88	18.5	441.4	441.4	1.32	1.62
B7 [18]	25.4	38.1	-	1.50	0.53	1.17	1.71	0.46	26.0	320.0	318.6	2.63	2.28
M1 [18]	25.4	38.1	-	1.50	0.83	0.55	1.38	1.39	29.9	326.2	353.1	3.12	2.58
B9 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	0.54	1.71	2.03	28.8	319.3	342.8	2.51	2.50
N-12-12 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.18	1.22	2.40	0.90	35.5	410.0	440.0	3.11	1.78
N-14-10 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.97	1.38	2.36	0.98	33.5	500.0	360.0	2.27	1.77
N-12-16 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.62	1.22	2.84	1.58	35.5	520.0	440.0	2.78	1.79
N-07-16 [15]	35.0	50.0	-	1.43	1.62	0.68	2.30	2.86	33.5	500.0	420.0	1.74	1.75
B8 [18]	25.4	38.1	-	1.50	0.53	2.61	3.14	0.21	26.8	322.1	320.0	1.47	1.70
B4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.98	29.2	320.0	323.4	1.81	1.77
M4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.11	1.42	3.53	1.44	26.6	318.6	326.9	1.84	1.74
B5 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.11	2.13	4.24	1.02	30.6	332.4	321.4	1.79	1.83
M5 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.67	1.81	4.47	1.50	28.0	335.2	331.0	1.71	1.79
M6 [18]	25.4	38.1	-	1.50	3.16	1.81	4.97	1.63	29.4	317.9	340.7	1.17	1.82

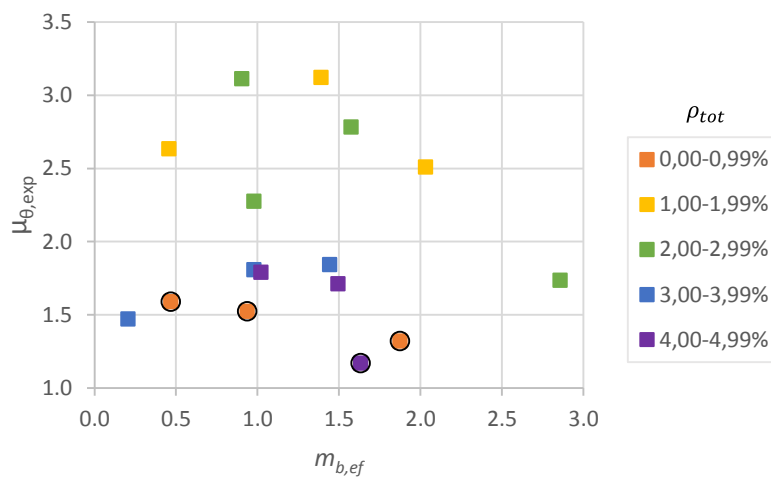


Fig.4.35 - Influência do equilíbrio de armaduras na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).

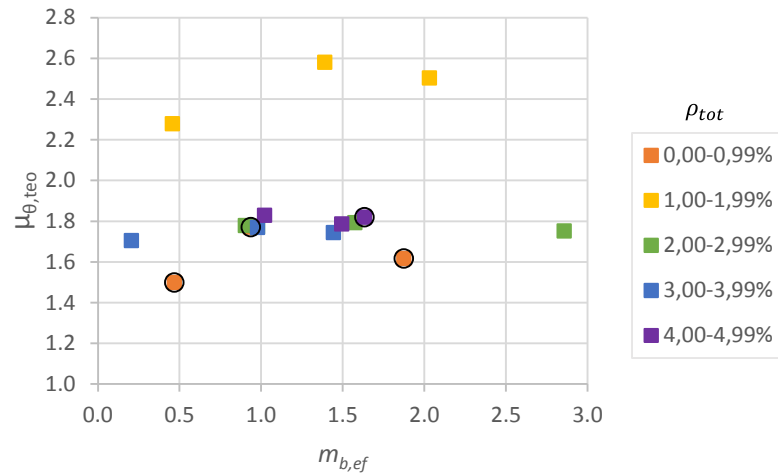


Fig.4.36 - Influência do equilíbrio de armaduras na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).

Mais uma vez, não é possível definir uma tendência clara da evolução da ductilidade em função do equilíbrio de armaduras, para uma dada gama da taxa de armadura de torção. No entanto, teoricamente é perceptível que a alteração do equilíbrio de “volume” de armaduras transversal e longitudinal não interfere muito na ductilidade em torção.

Para um dado valor de equilíbrio de armaduras, também não se consegue definir uma relação coerente entre a taxa total de armadura e a ductilidade em torção.

4.5.5.3 *Influência do equilíbrio de armadura na ductilidade em torção segundo séries com fatores de escala iguais*

O Quadro 4.16 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com fatores de escala iguais e valores de equilíbrio de armaduras variáveis. As Fig. 4.37 e 4.38 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.16 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com fatores de escala iguais e valores de equilíbrio de armaduras variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tyl} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
NBS-43-44 [13]	35.00	50.00	-	1.43	0.434	0.436	0.871	1.035	35.00	400.00	385.00	4.594	3.340
N-06-06 [15]	35.00	50.00	-	1.43	0.686	0.608	1.294	1.127	35.50	440.00	440.00	2.848	2.048
N-07-10 [15]	35.00	50.00	-	1.43	0.973	0.676	1.649	1.714	33.50	500.00	420.00	2.586	1.905
N-06-12 [15]	35.00	50.00	-	1.43	1.180	0.608	1.788	1.807	35.50	410.00	440.00	2.920	1.948
NBS-82-13 [13]	35.00	50.00	-	1.43	0.814	0.143	0.957	4.684	35.00	493.00	600.00	2.998	2.637
B8 [18]	25.40	38.10	-	1.50	0.533	2.607	3.141	0.206	26.76	322.07	320.00	1.472	1.705
B4 [18]	25.40	38.10	-	1.50	1.600	1.618	3.218	0.978	29.17	320.00	323.45	1.808	1.769
M4 [18]	25.40	38.10	-	1.50	2.107	1.422	3.529	1.444	26.55	318.62	326.90	1.842	1.743
VM1 [26]	29.40	16.00	-	1.84	0.638	0.657	1.295	0.754	39.10	442.38	568.91	1.369	2.492
VM2 [26]	44.00	24.00	-	1.83	0.625	0.645	1.270	0.958	36.10	431.59	436.49	1.573	2.175
VM3 [26]	58.70	32.00	-	1.83	0.684	0.650	1.334	1.095	40.00	461.01	442.38	2.018	2.291

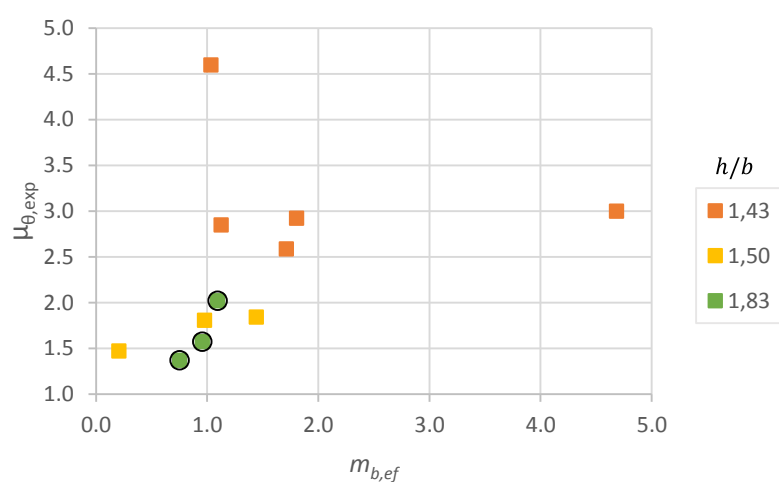


Fig.4.37 - Influência do equilíbrio de armaduras na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores experimentais - secção cheia).

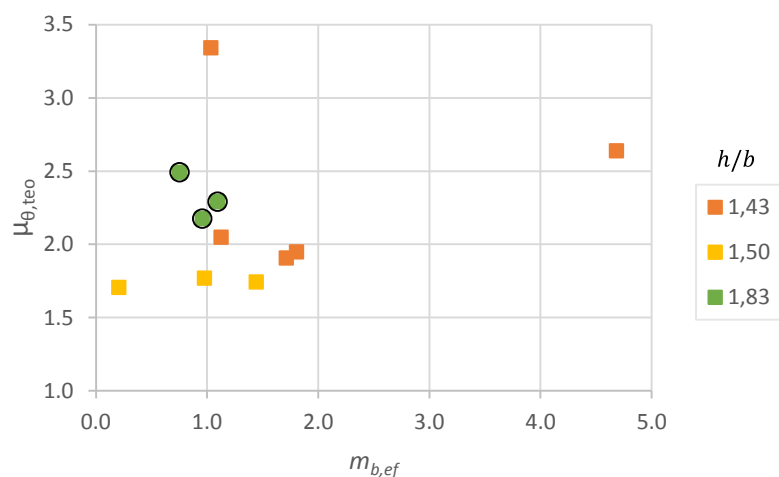


Fig.4.38 - Influência do equilíbrio de armaduras na ductilidade em torção, em séries com fatores de escala iguais (valores teóricos - secção cheia).

Novamente não é possível observar uma tendência clara da evolução da ductilidade sob a influência do equilíbrio de armadura nem uma relação entre o fator de escala e a ductilidade.

Se a série $h/b = 1,83$ for eliminada, devido a esta possuir vigas com um traçado incompleto de curvas $T - \theta$ e não ser possível definir a ductilidade real das vigas, verifica-se que a ductilidade aumenta com a diminuição do fator de escala. Contudo, com apenas duas séries e com poucos pontos, não é possível confirmar essa relação.

4.5.6 Influência do Fator de Escala na Ductilidade em Torção

O estudo do fator de escala (h/b) na ductilidade em torção passa por três análises: análise segundo séries de resistência do betão à compressão (f_{cm}) iguais ou semelhantes, análise segundo séries de taxas de armaduras (ρ_{tot}) iguais ou semelhantes e análise segundo séries de equilíbrios de armadura ($m_{b,ef}$) iguais ou semelhantes. Como novamente não se conseguiu reunir um número suficiente de vigas de secção vazada, estas análises só se realizaram para vigas de secção cheia. Em cada análise é apresentado um quadro com o agrupamento de vigas e suas características, dois gráficos de dispersão com os valores experimentais e teóricos dos índices de ductilidade calculados e, no final, são feitas algumas observações e conclusões retiradas a partir dos resultados apresentados. É de notar que, nos quadros de agrupamento de vigas e em cada série, as vigas encontram-se ordenadas por ordem crescente de fator de escala para facilitar a análise. Nas tabelas e gráficos de dispersão foram identificadas todas as vigas que apresentam curvas experimentais aparentemente incompletas e/ou com um comportamento atípico. Esta identificação tem como objetivo facilitar a identificação de possíveis vigas que fujam à tendência geral observada.

4.5.6.1 Influência do fator de escala na ductilidade em torção segundo séries de resistência do betão semelhantes

O Quadro 4.17 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com resistências do betão iguais ou semelhantes e fatores de escala variáveis. As Fig. 4.39 e 4.40 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.17 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com resistência do betão semelhantes e fatores de escala variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
VQ1 [26]	32.4	32.4	-	1.00	0.33	0.33	0.66	0.99	19.0	557.1	557.1	1.21	1.41
VS9 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.33	0.35	0.68	0.94	17.6	570.9	570.9	1.26	1.42
C4 [18]	25.4	25.4	-	1.00	1.76	1.76	3.52	1.03	27.2	336.6	327.6	1.61	1.76
B4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.98	29.2	320.0	323.4	1.81	1.77
G5 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.58	1.60	3.18	1.00	26.9	331.0	327.6	1.78	1.76
K3 [18]	15.2	49.5	-	3.25	1.59	1.58	3.17	0.99	29.0	315.9	320.7	1.73	1.80
N2 [18]	15.2	30.5	-	2.00	1.11	1.13	2.24	0.96	30.4	331.0	337.9	2.10	1.70
K2 [18]	15.2	49.5	-	3.25	1.03	1.03	2.05	0.99	30.6	335.9	337.9	1.54	1.86

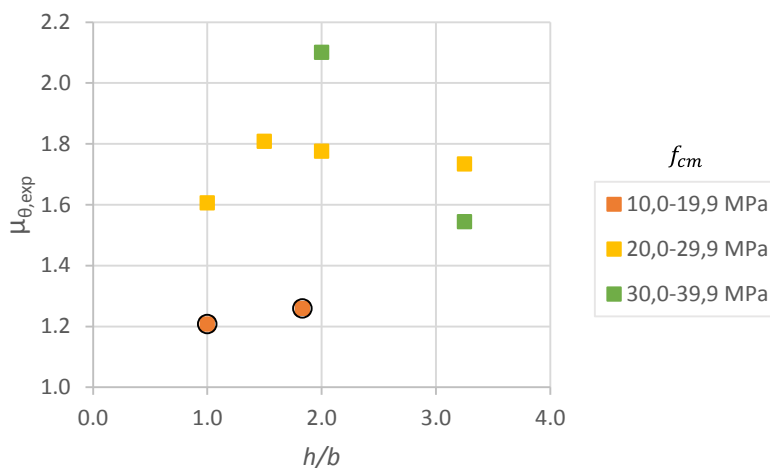


Fig.4.39- Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores experimentais - secção cheia).

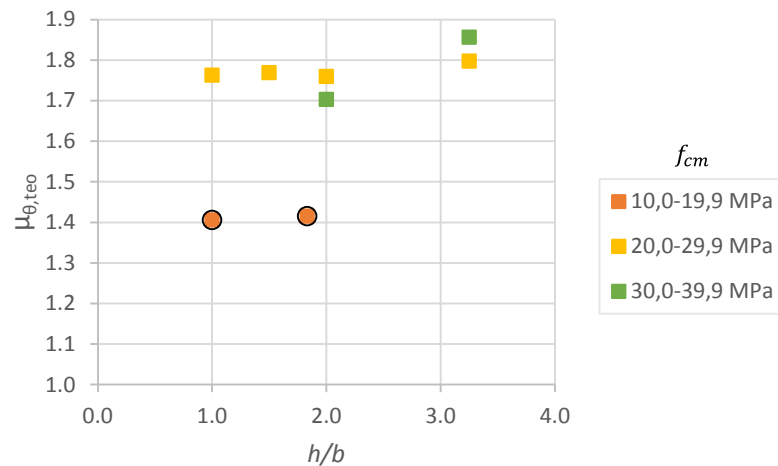


Fig.4.40 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com resistência do betão semelhantes (valores teóricos - secção cheia).

Quer em termos experimentais como teóricos, não há uma tendência bem definida da evolução da ductilidade sob a influência do fator de escala, para uma dada gama da resistência do betão.

A série $f_{cm} = 10,0-19,9 MPa$ possui uma ductilidade muito menor que as restantes séries. Este facto pode ser justificado pela elevada tensão de cedência das armaduras das vigas desta série.

Para um dado fator de escala, a ductilidade aparenta aumentar com o aumento da resistência do betão à compressão.

4.5.6.2 Influência do fator de escala na ductilidade em torção segundo séries taxas de armadura semelhantes

O Quadro 4.18 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com taxas de armadura iguais ou semelhantes e fatores de escala variáveis. As Fig. 4.41 e 4.42 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.18 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com taxas de armadura semelhantes e fatores de escala variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
VQ1 [26]	32.4	32.4	-	1.00	0.33	0.33	0.66	0.99	19.0	557.1	557.1	1.21	1.41
VS2-VQ2 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.35	0.37	0.72	0.94	19.0	432.6	432.6	1.52	1.77
VQ3 [26]	58.0	18.6	-	3.12	0.40	0.41	0.81	0.96	17.6	432.6	432.6	1.18	1.46
VQ9 [26]	80.6	14.0	-	5.76	0.45	0.45	0.90	0.99	19.5	441.4	441.4	1.20	1.49
A3 [27]	25.4	25.4	-	1.00	1.24	1.22	2.46	1.00	39.4	352.4	360.0	3.17	1.81
B3 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	1.17	2.35	1.02	28.1	327.6	320.0	1.63	1.69
B3 [27]	17.8	35.6	-	2.00	1.27	1.26	2.53	0.98	38.6	352.4	360.0	2.03	1.79
K2 [18]	15.2	49.5	-	3.25	1.03	1.03	2.05	0.99	30.6	335.9	337.9	1.54	1.86
C4 [18]	25.4	25.4	-	1.00	1.76	1.76	3.52	1.03	27.2	336.6	327.6	1.61	1.76
B4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.98	29.2	320.0	323.4	1.81	1.77
G5 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.58	1.60	3.18	1.00	26.9	331.0	327.6	1.78	1.76
K3 [18]	15.2	49.5	-	3.25	1.59	1.58	3.17	0.99	29.0	315.9	320.7	1.73	1.80
C5 [18]	25.4	25.4	-	1.00	2.40	2.37	4.77	1.01	27.2	328.3	329.0	2.22	1.80
B5 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.11	2.13	4.24	1.02	30.6	332.4	321.4	1.79	1.83
K4 [18]	15.2	49.5	-	3.25	2.26	2.28	4.54	1.00	28.6	344.1	340.0	2.21	1.85

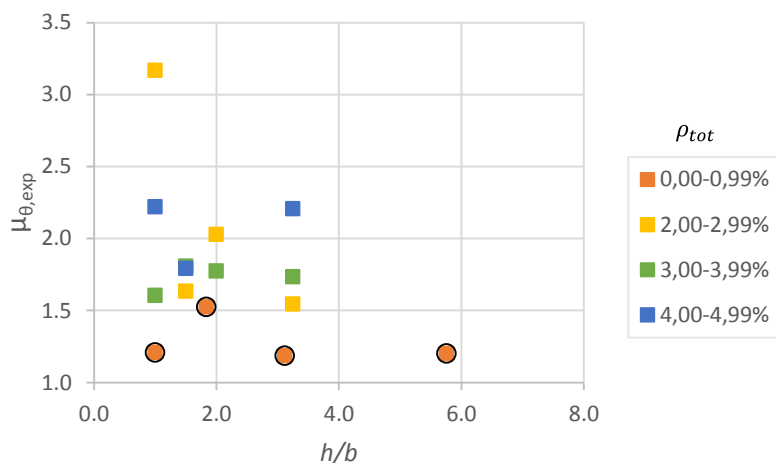


Fig.4.41 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).

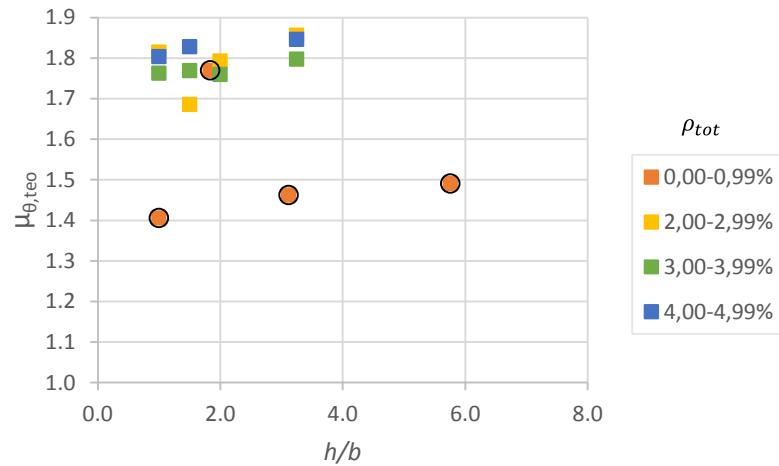


Fig.4.42 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com taxas de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).

Novamente, não é possível observar uma tendência clara da evolução da ductilidade sob a influência do fator de escala, para uma dada gama da taxa de armadura.

A série $\rho_{tot} = 0,00-0,99\%$ possui uma ductilidade inferior às restantes séries devido à tensão de cedência das armaduras serem superiores às restantes vigas.

4.5.6.3 Influência do fator de escala na ductilidade em torção segundo séries com equilíbrios de armadura semelhantes

O Quadro 4.19 apresenta vigas de secção cheia agrupadas em séries com equilíbrio de armaduras iguais ou semelhantes e fatores de escala variáveis. As Fig. 4.43 e 4.44 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência da taxa de armadura na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.19 - Agrupamento de vigas de secção cheia em séries com equilíbrios de armadura semelhantes e fatores de escala variáveis.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
A3 [27]	25.40	25.40	-	1.00	1.240	1.215	2.455	0.999	39.38	352.41	360.00	3.167	1.814
N2 [18]	15.24	30.48	-	2.00	1.111	1.129	2.240	0.964	30.41	331.03	337.93	2.101	1.703
K2 [18]	15.24	49.53	-	3.25	1.026	1.026	2.051	0.994	30.62	335.86	337.93	1.544	1.856
B3 [18]	25.40	38.10	-	1.50	1.173	1.173	2.347	1.024	28.07	327.59	320.00	1.633	1.685
G4 [18]	25.40	50.80	-	2.00	1.200	1.200	2.400	1.013	28.28	325.52	321.38	1.545	1.701

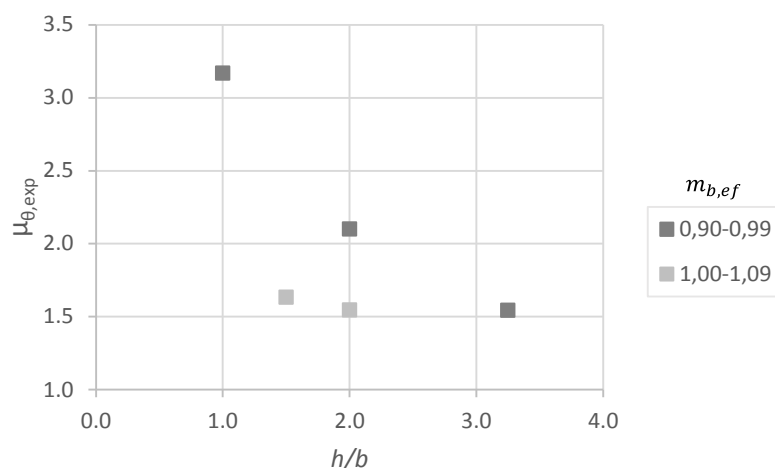


Fig.4.43 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores experimentais - secção cheia).

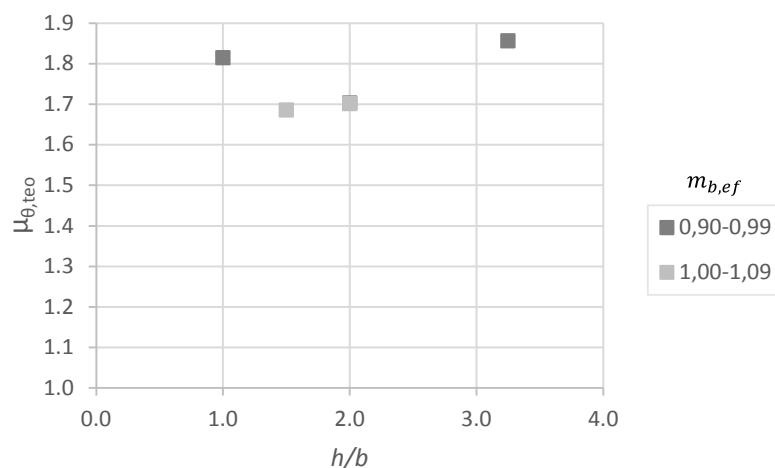


Fig.4.44 - Influência do fator de escala na ductilidade em torção, em séries com equilíbrios de armadura semelhantes (valores teóricos - secção cheia).

Experimentalmente, verifica-se uma diminuição da ductilidade com o aumento do fator de escala, para uma dada gama de equilíbrio de armaduras. No entanto, teoricamente tal tendência não é observada. Dado só existirem duas séries com poucas vigas, esta tendência não pode ser tomada como certa.

Para um dado fator de escala, experimentalmente a ductilidade aparenta aumentar com a diminuição do valor de equilíbrio de armaduras, ou seja, com o aumento da quantidade de armadura transversal em relação à armadura longitudinal. No entanto, as considerações anteriormente apontadas são aqui também válidas.

4.5.7 Influência do Tipo de Secção na Ductilidade em Torção

Para estudar a influência do tipo de secção das vigas na ductilidade em torção foi necessário criar dois novos agrupamentos de vigas. Ao contrário das análises anteriores, os agrupamentos de vigas foram feitos tendo em conta apenas três variáveis de estudo: tipo de secção (cheia ou vazada), equilíbrio de armaduras ($m_{b,ef}$) e fator de escala (h/b). Para este estudo apenas se considerou as vigas que possuíam armaduras equilibradas, ou seja, $m_{b,ef} \approx 1,00$. Foram criados dois novos quadros, semelhantes ao quadro base, um dedicado a vigas com fator de escala unitário e outro a vigas com fator de escala não unitário. Cada quadro está dividido em duas séries, uma para cada tipo de secção.

Na análise seguinte são apresentados os quadros com o agrupamento de vigas descrito e suas características, dois gráficos de dispersão com os valores experimentais e teóricos dos índices de ductilidade calculados e, no final, são feitas algumas observações e conclusões retiradas a partir dos resultados apresentados. Nas tabelas e gráficos de dispersão foram identificadas todas as vigas que apresentam curvas experimentais aparentemente incompletas e/ou com um comportamento atípico. Esta identificação tem como objetivo facilitar a identificação de possíveis vigas que fujam à tendência geral observada.

4.5.7.1 *Influência do tipo de secção na ductilidade em vigas com armaduras equilibradas e fator de escala unitário*

O Quadro 4.20 apresenta vigas com armaduras equilibradas e fator de escala unitário agrupadas por tipo de secção (cheia e vazada). As Fig. 4.45 e 4.46 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência do tipo de secção na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.20 - Agrupamento de vigas com armaduras equilibradas e fator de escala unitário.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
C4 [18]	25.4	25.4	-	1.00	1.76	1.76	3.52	1.03	27.2	336.6	327.6	1.61	1.76
C5 [18]	25.4	25.4	-	1.00	2.40	2.37	4.77	1.01	27.2	328.3	329.0	2.22	1.80
C6 [18]	25.4	25.4	-	1.00	3.16	3.20	6.36	0.95	27.6	315.9	327.6	1.65	1.85
A2 [27]	25.4	25.4	-	1.00	0.80	1.08	1.88	0.99	38.2	380.0	285.0	1.96	2.78
A3 [27]	25.4	25.4	-	1.00	1.24	1.22	2.46	1.00	39.4	352.4	360.0	3.17	1.81
A4 [27]	25.4	25.4	-	1.00	1.76	1.69	3.45	1.02	39.2	351.0	360.0	1.46	1.86
T1 [25]	50.0	50.0	8.0	1.00	0.72	0.75	1.72	0.97	35.3	356.7	356.7	1.51	2.56
T2 [25]	50.0	50.0	8.0	1.00	0.72	0.71	1.72	1.02	35.3	357.0	357.0	2.34	2.57
VH1 [26]	32.4	32.4	8.0	1.00	0.33	0.33	1.33	0.99	17.2	447.3	447.3	1.21	1.41
VH2 [26]	32.4	32.4	8.0	1.00	0.66	0.67	1.66	0.99	17.2	447.3	447.3	1.94	1.55
A1 [7]	60.0	60.0	9.8	1.00	0.18	0.19	0.37	1.05	48.4	695.9	636.7	3.45	3.68
A2 [7]	60.0	60.0	10.7	1.00	0.39	0.37	0.76	1.00	47.3	672.4	695.9	2.22	1.99
A3 [7]	60.0	60.0	10.9	1.00	0.50	0.49	1.00	0.96	46.2	672.4	714.8	1.47	1.68
A4 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	0.66	0.65	1.31	1.03	54.8	723.9	714.8	1.53	1.82
A5 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	0.85	0.83	1.68	1.11	53.1	723.9	672.4	1.45	1.77
B2 [7]	60.0	60.0	10.8	1.00	0.41	0.40	0.80	0.99	69.8	672.4	695.9	1.73	2.44
B3 [7]	60.0	60.0	10.9	1.00	0.66	0.67	1.33	1.00	77.8	723.9	714.8	1.39	1.76
B4 [7]	60.0	60.0	11.2	1.00	0.89	0.89	1.78	1.09	79.8	723.9	672.4	1.32	1.67
C1 [7]	60.0	60.0	9.7	1.00	0.18	0.19	0.37	1.04	91.7	695.9	636.7	1.80	5.09
C2 [7]	60.0	60.0	10.0	1.00	0.39	0.37	0.76	1.01	94.8	672.4	695.9	1.55	2.97
C3 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.66	0.63	1.29	1.06	91.6	723.9	714.8	1.19	1.73
C4 [7]	60.0	60.0	10.3	1.00	0.85	0.86	1.71	1.07	91.4	723.9	672.4	1.21	1.58
C5 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	1.02	1.05	2.07	1.05	96.7	723.9	672.4	1.20	1.57
C6 [7]	60.0	60.0	10.4	1.00	1.34	1.34	2.68	1.08	87.5	723.9	672.4	1.30	1.71

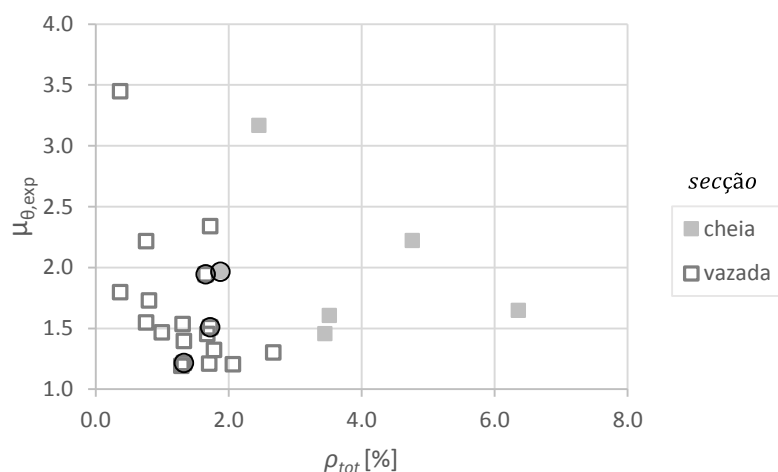


Fig.4.45 - Influência do tipo de seção na ductilidade em torção, em vigas de armadura equilibrada e fator de escala unitário (valores experimentais).

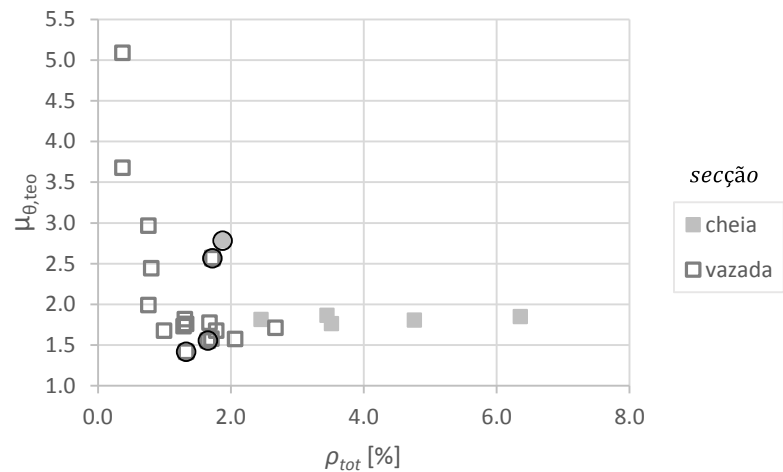


Fig.4.46 - Influência do tipo de seção na ductilidade em torção, em vigas de armadura equilibrada e fator de escala não unitário (valores teóricos).

Em termos teóricos, verifica-se uma diminuição acentuada da ductilidade em torção para valores baixos de taxa de armadura. A partir dos intervalos entre $\rho_{tot} = 1,0\%$ e $\rho_{tot} = 2,0\%$ (para vigas de seção vazada) e entre $\rho_{tot} = 2,0\%$ e $\rho_{tot} = 3,0\%$ (para vigas de seção cheia) a ductilidade tende a estabilizar num valor compreendido entre $\mu_{\theta} = 1,5$ e $\mu_{\theta} = 2,0$. Em termos experimentais, as vigas de seção vazada acompanham a tendência teórica no entanto, vigas de seção cheia não apresentam uma tendência clara dada a dispersão dos resultados.

Para uma dada taxa de armadura, a ductilidade mostra ser superior em vigas de seção cheia. Tal deve-se provavelmente à maior capacidade de redistribuição de tensões transversais a seções cheias no estado último comportamental, comparativamente à vigas com seção vazada.

4.5.7.2 Influência do tipo de seção na ductilidade em vigas com armaduras equilibradas e fator de escala não unitário

O Quadro 4.21 apresenta vigas com armaduras equilibradas e fator de escala não unitário agrupadas por tipo de seção (cheia e vazada). As Fig. 4.47 e 4.48 apresentam gráficos de dispersão (de valores experimentais e teóricos, respetivamente) onde mostram a influência do tipo de seção na ductilidade em torção das séries do referido quadro.

Quadro 4.21 - Agrupamento de vigas com armaduras equilibradas e fator de escala não unitário.

Viga	x (cm)	y (cm)	t (cm)	h/b	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$	f_{cm} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	μ_{θ}^{exp}	μ_{θ}^{teo}
B3 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	1.17	2.35	1.02	28.1	327.6	320.0	1.63	1.69
B4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.98	29.2	320.0	323.4	1.81	1.77
B5 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.11	2.13	4.24	1.02	30.6	332.4	321.4	1.79	1.83
B6 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.67	2.61	5.27	1.05	28.8	331.7	322.8	1.44	1.83
G3 [18]	25.4	50.8	-	2.00	0.88	0.88	1.76	1.03	26.8	338.6	327.6	1.91	1.89
G4 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.20	1.20	2.40	1.01	28.3	325.5	321.4	1.55	1.70
G5 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.58	1.60	3.18	1.00	26.9	331.0	327.6	1.78	1.76
G7 [18]	25.4	50.8	-	2.00	0.93	0.94	1.87	0.98	31.0	319.3	322.8	2.38	2.17
G8 [18]	25.4	50.8	-	2.00	1.32	1.31	2.63	0.99	28.3	322.1	329.0	1.96	1.72
I3 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.17	1.17	2.35	1.03	44.8	343.4	333.8	3.09	2.38
I4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.96	45.0	315.2	326.2	1.67	1.97
I6 [18]	25.4	38.1	-	1.50	2.67	2.61	5.27	1.01	45.8	325.5	329.0	2.19	1.99
J4 [18]	25.4	38.1	-	1.50	1.60	1.62	3.22	0.97	16.8	324.1	331.7	1.66	1.62
K2 [18]	15.2	49.5	-	3.25	1.03	1.03	2.05	0.99	30.6	335.9	337.9	1.54	1.86
K3 [18]	15.2	49.5	-	3.25	1.59	1.58	3.17	0.99	29.0	315.9	320.7	1.73	1.80
K4 [18]	15.2	49.5	-	3.25	2.26	2.28	4.54	1.00	28.6	344.1	340.0	2.21	1.85
N1 [18]	15.2	30.5	-	2.00	0.61	0.62	1.23	1.01	29.5	352.4	341.4	4.29	2.64
N1a [18]	15.2	30.5	-	2.00	0.61	0.62	1.23	0.98	28.7	346.2	344.8	4.21	2.56
N2 [18]	15.2	30.5	-	2.00	1.11	1.13	2.24	0.96	30.4	331.0	337.9	2.10	1.70
N3 [18]	15.2	30.5	-	2.00	0.92	0.90	1.82	1.02	27.3	351.7	351.7	2.71	1.69
N4 [18]	15.2	30.5	-	2.00	1.42	1.42	2.84	0.96	27.3	340.9	355.9	2.26	1.74
VM2 [26]	44.0	24.0	-	1.83	0.63	0.65	1.27	0.96	36.1	431.6	436.5	1.57	2.18
VM3 [26]	58.7	32.0	-	1.83	0.68	0.65	1.33	1.10	40.0	461.0	442.4	2.02	2.29
VQ1 [26]	32.4	32.4	-	1.00	0.33	0.33	0.66	0.99	19.0	557.1	557.1	1.21	1.41
VQ3 [26]	58.0	18.6	-	3.12	0.40	0.41	0.81	0.96	17.6	432.6	432.6	1.18	1.46
VQ9 [26]	80.6	14.0	-	5.76	0.45	0.45	0.90	0.99	19.5	441.4	441.4	1.20	1.49
B3 [27]	17.8	35.6	-	2.00	1.27	1.26	2.53	0.98	38.6	352.4	360.0	2.03	1.79
B4 [27]	17.8	35.6	-	2.00	1.80	1.73	3.52	1.02	38.5	351.0	360.0	1.87	1.89
B12UR3 [24]	20.3	30.5	-	1.50	1.06	1.04	2.10	1.00	72.9	379.5	386.0	3.14	2.94
H-14-10 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.97	1.38	2.36	0.98	68.4	500.0	360.0	3.80	2.37
N-14-10 [15]	35.0	50.0	-	1.43	0.97	1.38	2.36	0.98	33.5	500.0	360.0	2.27	1.77
NBS-43-44 [13]	35.0	50.0	-	1.43	0.43	0.44	0.87	1.03	35.0	400.0	385.0	4.59	3.34
C100a [23]	49.9	72.3	12.7	1.45	0.79	0.79	2.24	1.04	90.6	466.0	447.0	2.31	3.26
D090a [23]	50.1	72.2	10.5	1.44	0.79	0.79	2.23	1.04	105.7	466.0	447.0	2.81	3.58

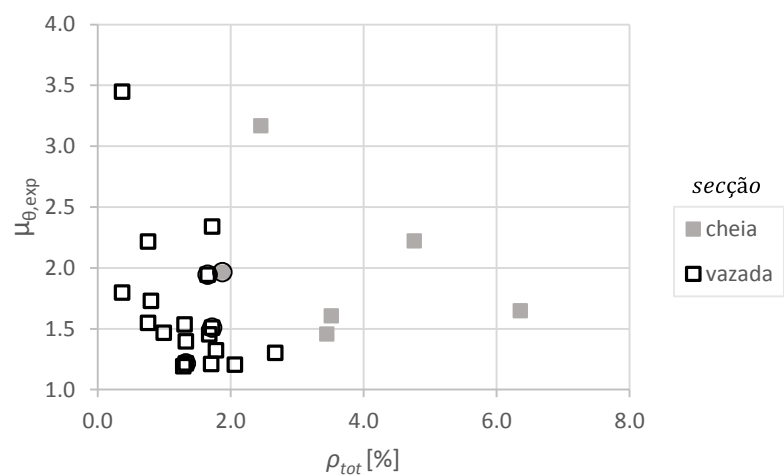


Fig.4.47 - Influência do *tipo de secção* na ductilidade em torção, em vigas de armadura equilibrada e fator de escala não unitário (valores experimentais).

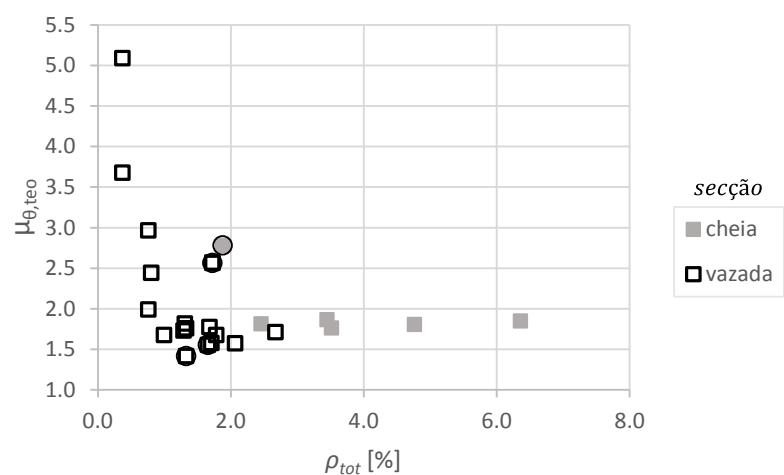


Fig.4.48 - Influência do *tipo de secção* na ductilidade em torção, em vigas de armadura equilibrada e fator de escala não unitário (valores teóricos).

Dado só haver duas vigas de secção vazada, não é possível definir a tendência da ductilidade em função do tipo de secção. Vigas com secção cheia e fator de escala não unitário mantêm a mesma tendência de ductilidade das vigas de secção cheia com fator de escala unitário.

4.6 Notas finais

Após a análise da ductilidade em torção das vigas de referência, resumem-se em baixo as principais conclusões do estudo:

- Os parâmetros que mais influenciam a ductilidade em torção são a resistência do betão à compressão e a taxa de armadura de torção;

- Para vigas de secção cheia, a resistência do betão tem um efeito favorável na ductilidade das vigas. No entanto, em vigas de secção vazada a ductilidade diminui com o aumento da resistência do betão. Esta distinção de tendências pode ser justificada pela presença ou ausência de núcleo central na secção das vigas. Este núcleo permite a redistribuição transversal das tensões para o interior da secção. Desta forma, ao contrário das secções cheias e à medida que a resistência do betão aumenta em vigas de secção vazada, este processo de redistribuição não ocorre de forma pronunciada e, consequentemente, não se dá uma degradação gradual da viga para estados de tensão mais elevados e compatíveis com a maior resistência do betão.

- A tendência da ductilidade sob a influência da taxa de armadura em vigas de secção cheia e vazada são semelhantes. A ductilidade tende a diminuir acentuadamente com o aumento da taxa de armadura até uma determinada percentagem de armadura. Depois dessa percentagem, a ductilidade aparenta estabilizar num valor relativamente pequeno mas não nulo. O valor limite da taxa de armadura a partir da qual a sua influência na ductilidade se torna menos acentuada aparenta depender da classe de resistência do betão. Para vigas de secção cheia, tal valor aparenta rondar a gama dos 2,0-3,0% para a taxa de armadura enquanto que para vigas de secção vazada, esta gama é ligeiramente inferior e ronda os 1,0-1,5% para a taxa de armadura. Para valores mais elevados de resistência do betão, a referida taxa limite aparenta aumentar.

- No geral, o equilíbrio de “volume” das armaduras não aparenta ter uma influência notável na ductilidade das vigas sujeitas à torção. No entanto, existem dois casos de análise onde foi possível observar uma possível influência do equilíbrio de armaduras. Para vigas secções cheias com resistências semelhantes de betão, a ductilidade aparenta ser maior quando a armadura das vigas se encontra equilibrada. Porém, para vigas de secção cheia com fatores de escala iguais, a ductilidade aparenta aumentar com a diminuição do parâmetro $m_{b,ef}$, ou seja, com o aumento da quantidade de armadura transversal em relação à armadura longitudinal. Ambas as tendências observadas não podem ser consideradas como gerais, dado o número reduzido de vigas em estudo

- A tendência da ductilidade sob a influência do fator de escala, apesar de ser reduzida, não é consensual. Para uma dada gama de resistência do betão e para ambos os tipos de secção, a ductilidade aparenta aumentar com o aumento do fator de escala. Tal poderá ser explicado pelo facto de que o aumento da área da secção permite uma maior possibilidade para a redistribuição transversal das tensões. Contudo, para vigas de secção cheia com taxa de armaduras semelhantes ou equilíbrio de “volume” de armaduras semelhantes, a ductilidade aparenta diminuir com o aumento do fator de escala. Estas últimas tendências não podem ser consideradas como gerais, dado o número reduzido de vigas em estudo.

-Finalmente, vigas de secção cheia possuem uma ductilidade ligeiramente superior do que as vigas de secção vazada. Este fenómeno justifica-se pela presença de núcleo central que tem um efeito favorável para a redistribuição transversal de tensões no estado último comportamental.

CAPÍTULO 5 - Comparação com Disposições Normativas

5.1 Introdução

Neste capítulo é feita uma análise comparativa dos resultados experimentais das vigas de referência deste trabalho face a algumas disposições normativas dos documentos analisados no Capítulo 3 (os códigos americanos ACI 318R-89 [1] e ACI 318R-11 [2], os códigos europeus MC90 [9], MC10 [10] e EC2 [11] e o código canadiano CSA A23.3-04 [14]).

Numa primeira fase é efetuada a verificação das vigas em estudo neste trabalho à luz dos referidos documentos normativos. O objetivo é encarar com reserva, à partida, vigas que não cumprem os requisitos básicos dos documentos normativos, e que, por isso, apresentarão certamente um comportamento atípico à torção. Ainda assim, as vigas que não cumprem as limitações para as quantidades de armaduras (longitudinal e/ou transversal) impostas serão em geral consideradas para análise, com vista a averiguar se tais limitações são adequadas face ao comportamento experimental observado para as mesmas. De seguida é feita uma análise sobre a previsão teórica da capacidade torsional e sobre a imposição dos limites mínimos e máximos para as armaduras de torção com vista a garantir uma rotura não pretura bem como uma ductilidade em rotura, sendo este último aspeto o principal foco deste trabalho. Ao longo deste capítulo são apresentadas conclusões gerais retiradas das análises realizadas.

5.2 Verificação das Limitações Normativas

Antes de proceder a qualquer análise comparativa, torna-se necessário começar por fazer uma verificação normativa das vigas estudadas à luz das imposições dos documentos normativos analisados no Capítulo 3.

De uma forma geral, as disposições relativas à verificação das vigas referem-se aos limites mínimos e máximos impostos para as armaduras de torção, bem como aos limites referentes a algumas disposições construtivas para as armaduras, como é o caso do espaçamento máximo das cintas, do espaçamento máximo dos varões longitudinais e do diâmetro mínimo dos varões longitudinais. É de salientar que apenas serão analisadas as disposições específicas referentes ao caso da torção pura e com principal ênfase o Estado Limite Último. Por isso, algumas das disposições relativas ao controlo da fissuração e que os documentos remetem para o caso da flexão e do esforço transversal, por não incorporarem disposições específicas para a torção, não serão aqui contempladas.

5.2.1 Código Americano ACI 318R-89 [1]

O código americano ACI 318R-89 incorpora as seguintes limitações:

- área mínima de um ramo da armadura transversal: Eq.3.9;
- área mínima da armadura longitudinal total: Eq.3.11;
- área máxima de um ramo da armadura transversal: Eq.3.13;
- espaçamento máximo das cintas: mínimo entre $(x_1 + x_2/4)$ e 12 in (30,48 cm);
- diâmetro mínimo da armadura longitudinal: varão No.3 ($\approx \phi 10$);
- espaçamento máximo da armadura longitudinal: 12 in (30,48 cm);
- valor máximo da tensão de cedência da armadura: 60000 psi (413,79 MPa).

O Quadro V.1 do Anexo V resume as características das vigas de referência, em unidades imperiais, necessárias para o cálculo dos vários parâmetros de controlo por forma a verificar as mesmas segundo o ACI 318R-89. Os significados dos parâmetros expostos no Quadro V.1 foram já referidos ao longo da Secção 3.2.

O Quadro V.2 do Anexo V apresenta as verificações regulamentares do ACI 318R-89 relativas à limitação das áreas de armadura de torção, como é o caso da verificação do limite mínimo e máximo para a armadura transversal ($A_{t,min}/s$ e $A_{t,max}/s$, respetivamente) relativamente à armadura transversal efetiva ($A_{t,ef}/s$) e da verificação do limite mínimo para a armadura longitudinal total ($A_{l,min}$) relativamente à armadura longitudinal efetiva ($A_{l,ef}$). O Quadro V.3 do Anexo V apresenta as verificações regulamentares do código em análise relativas às disposições construtivas das armaduras, como é o caso da verificação do limite máximo para o espaçamento das cintas e dos varões longitudinais ($s_{t,max}$ e $s_{l,max}$, respetivamente) relativamente aos valores dos espaçamentos efetivos ($s_{t,ef}$ e $s_{l,ef}$, respetivamente), da verificação do valor mínimo do diâmetro da armadura longitudinal ($\phi_{l,min}$) relativamente ao valor efetivo para o varão de canto ($\phi_{l,ef,canto}$) e da verificação do valor máximo da tensão de cedência ($f_{y,max}$) face ao valor efetivo ($f_{y,ef}$).

O Quadro 5.1 apresenta um resumo de todas as vigas que não verificam as limitações do código americano.

Quadro 5.1 - Vigas que não cumprem as disposições do código americano ACI 318R-89 [1].

Parâmetro	Vigas que não cumprem a disposição do código
$A_{t,min}/s$	VQ9 [26]
$A_{t,max}/s$	B4, B5, B6, B8, C5, C6, G4, G5, G8, D4, I5, I6, J3, J4, K2, K3, K4, M4, M5, M6, N2, N2a e N4 [18]; VH2 [26]; B3 e B4 [27]; H-20-20, N-12-16, N-14-10 e N-20-20 [15]; C6 [7]
$A_{l,min}$	J1 [18]; VH1, VM1, VM2, VM3, VQ1, VQ3, VQ9, VS2-VQ2, VS3, VS4-VQ5, VS9, VU1, VU2, VU3 e VU4 [26]; NBS-43-44 [23]; A1 e C1 [7]; A095c, A120a e B110a [23]
$s_{t,max}$	B9, J1, M1 e N2a [18]; NBS-82-13 [13]; SWA-1 [29]
$s_{l,max}$	B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, D3, D4, G3, G4, G5, G7, G8, I3, I4, I5, I6, J1, J2, J3, J4, K2, K3, K4, M1, M2, M3, M4, M5 e M6 [18]; VM3 [26]
$\phi_{l,min}$	VB2, VB3, VB4, VH1, VH2, VM1, VQ1, VQ3, VQ9, VS2-VQ2, VS3, VS4-VQ5, VS9, VS10-VB1, VU1, VU2, VU3 e VU4 [26]; NBS-82-13 [13]; T5 [25]; A1 e C1 [7]
$f_{y,max}$	VB2, VB3, VB4, VH1, VH2, VM1, VM2, VM3, VQ1, VQ3, VQ9, VS2-VQ2, VS3, VS4-VQ5, VS9, VS10-VB1, VU1, VU2, VU3 e VU4 [26]; H-07-10, H-07-16, H-12-16, H-14-10, H-20-20, N-06-06, N-07-10, N-07-16, N-12-16, N-14-10, N-20-20 [15]; NBS-82-13 [13]; SW4-1 [29]; T5 [25]; A1, A2, A3, A4, A5, B2, B3, B4, B5, C1, C2, C3, C4, C5 e C6 [7]; A120a, B065b, B080a, B110a, C100a, D075a, D090a [23]

Em relação à limitação inferior das armaduras transversais, apenas a viga VQ9 [26] não cumpre o este limite. Contudo, dado que a diferença entre o valor mínimo e o valor efetivo da armadura não é muito grande, considera-se que todas as vigas de referência estão em concordância com o código em análise. No que toca à limitação superior das armaduras transversais, as vigas de Hsu [18] são as que se destacam por possuírem mais área de armadura transversal do que a permitida pelo código. Isto leva a pressupor que, à luz do ACI 318R-89, estas vigas sofreram uma rotura frágil em torção por compressão do betão nas escoras, o que não é confirmado nas curvas $T - \theta$ experimentais. Devido à influencia da “cedência” do betão na ductilidade em torção, todas elas apresentam um intervalo de comportamento dúctil, (umas vigas com comportamento mais acentuado do que outras). Como foi referido no início deste capítulo, as vigas anteriormente citadas serão consideradas para as análises subsequentes.

Relativamente à limitação inferior da armadura longitudinal, as vigas de Leonhardt e Schelling [26] destacam-se por possuírem armadura longitudinal inferior à exigida pelo código em análise. No entanto é observado dois casos distintos no cálculo da armadura mínima

longitudinal. No primeiro caso de cálculo, a armadura longitudinal mínima é desproporcional em relação à armadura mínima transversal. No segundo caso de cálculo, a armadura mínima longitudinal é negativa. Em 1999, Ali e White [3] justificam estas duas situações com a base empírica que está por detrás das disposições relativas a esta limitação. Tais casos surgem quando as vigas apresentam determinados limites de armadura (taxas de armadura alta ou muito baixa). Assim, todas as vigas que possuírem uma destas taxas de armadura devem ser encaradas com muita reserva, mas serão consideradas para as análises subsequentes.

Em relação ao espaçamento máximo transversal ($s_{t,max}$), são poucas as vigas que não cumprem este limite. Apenas a viga SW4-1 de Peng e Wang [29] se destaca pela grande diferença de valores entre o limite exigido e o espaçamento efetivo. Já em relação ao limite máximo do espaçamento longitudinal, o número de vigas que não cumprem este limite é maior que o anterior. À exceção das vigas G de Hsu [18], a diferença entre o valor limite do espaçamento longitudinal e o valor efetivo das vigas que não cumprem o requisito é mínima, podendo ser aceites.

No que toca à armadura longitudinal, recorde-se que a limitação inferior do seu diâmetro destina-se a conferir uma rigidez suficiente aos varões de canto para absorver a força de desvio, resultante na mudança de direção das escoras do betão (Fig.3.1). O valor efetivo do diâmetro da armadura longitudinal ($\phi_{l,ef,canto}$) apresentado no Quadro V.3 é referido apenas aos varões de canto. Por isso, a não verificação da limitação em causa pode ser contrabalançada com os reduzidos espaçamentos efetivos da armadura transversal que a maioria das vigas apresenta. Novamente, as vigas de Leonhardt e Schelling [26] destacam-se das restantes vigas por não cumprirem este limite.

Relativamente à verificação do limite máximo da tensão de cedência das armaduras de torção, a maioria das vigas de referência ultrapassam este limite. Tal limite tem como objetivo um melhor controlo indireto da distribuição da fissuração e da abertura de fendas em serviço. Por isso, o incumprimento por parte destas vigas não é considerado relevante para a análise deste capítulo (focado na fase última de comportamento das vigas).

5.2.2 Código Americano ACI 318R-11 [2]

O código americano ACI 318R-11 possui as seguintes limitações:

- área mínima de um ramo da armadura transversal: Eq.3.23;
- área mínima da armadura longitudinal total: Eq.3.24;
- área máxima de um ramo da armadura transversal: Eqs.3.19 e 3.20 (equações derivadas a partir da limitação da tensão no betão das escoras);
- espaçamento máximo das cintas: mínimo entre $p_h/8$ e 12 in (30,48 cm);
- diâmetro mínimo da armadura longitudinal: $0,042s_t$ e superior a No.3 ($\approx \phi 10$);
- espaçamento máximo da armadura longitudinal: 12in (30,48cm);
- valor máximo da tensão de cedência da armadura: 60000psi (413,79MPa).

O Quadro V.4 do Anexo V resume as características das vigas de referência que não foram apresentadas no Quadro V.1, em unidades imperiais, e necessárias para o cálculo dos vários parâmetros de controlo por forma a verificar as vigas segundo o ACI 318R-11. Os significados dos parâmetros expostos no Quadro V.4 foram referidos ao longo da Secção 3.3.

O Quadros V.5 do Anexo V resume as mesmas verificações efetuadas nos Quadros V.2 e V.3 do Anexo V, agora com base no ACI 318R-11. As verificações relativas ao espaçamento máximo da armadura longitudinal, bem como à tensão de cedência máxima da armadura de torção são iguais às apresentadas no Quadro V.3, pelo que não são repetidas no Quadro V.5 Também a verificação relativa ao diâmetro mínimo da armadura longitudinal acaba por ser igual à apresentada no Quadro V.3, dado que o espaçamento efetivo adotado no cálculo do diâmetro mínimo $0,042s_t$ é muito pequeno e o resultado obtido é inferior a $\phi 10$. Esta verificação também não é repetida no Quadro V.5.

O Quadro 5.2 apresenta um resumo de todas as vigas que não verificam as limitações do código americano.

Quadro 5.2 - Vigas que não cumprem as disposições do código americano ACI 318R-11 [2].

Parâmetro	Vigas que não cumprem as disposições regulamentares
$A_{t,min}/s$	VQ9 [26]
$A_{t,máx}/s$	B3, B4, B5, B6, B8, C4, C5, C6, D3, D4, G3, G4, G5, G7, G8, I3, I4, I5, I6, J2, J3, J4, K2, K3, K4, M2, M3, M4, M5, M6, N2, N3 e N4 [18]; VB2, VB3, VH2, VS4-VQ5, VS10-VB1 e VU3 [26]; A2, A3, A4, B3 e B4 [27]; B5UR1, B12UR4 e B12UR5 [24]; H-07-16, H-12-12, H-12-16, H-14-10, H-20-20, N-06-12, N-07-10, N-07-16, N-12-12, N-12-16, N-14-10 e N-20-20 [15]; SW4-1 [29]; T0, T1 e T2 [25]; A3, A4, A5, B3, B4, B5, C3, C4, C5 e C6 [7]; B065b, B080a e D075a [23]
$A_{l,min}$	A1 e C1 [7]; C065b [23]
$s_{t,máx}$	B9, J1, M1, M3 e N2a [18]; B5UR1, B7UR1, B9UR1, B12UR1 e B14UR1 [24]; NBS-82-13 [13]; SWA-1 [29]
φ_{min}	VB2, VB3, VB4, VH1, VH2, VM1, VQ1, VQ3, VQ9, VS2-VQ2, VS3, VS4-VQ5, VS9, VS10-VB1, VU1, VU2, VU3 e VU4 [26]; NBS-82-13 [13]; T5 [25]; A1 e C1 [7]
$f_{y,máx}$	VB2, VB3, VB4, VH1, VH2, VM1, VM2, VM3, VQ1, VQ3, VQ9, VS2-VQ2, VS3, VS4-VQ5, VS9, VS10-VB1, VU1, VU2, VU3 e VU4 [26], H-07-10, H-07-16, H-12-16, H-14-10, H-20-20, N-06-06, N-07-10, N-07-16, N-12-16, N-14-10, N-20-20 [15]; NBS-82-13 [13]; SW4-1 [29]; T5 [26]; A1, A2, A3, A4, A5, B2, B3, B4, B5, C1, C2, C3, C4, C5 e C6 [7]; A120a, B065b, B080a, B110a, C100a, D075a, D090a [23]

À semelhança do ACI 318R-89 [1], apenas a viga VQ9 [26] não cumpre o limite mas, pelo mesmo motivo enunciado atrás, todas as vigas de referência estão de acordo com o limite do ACI 318R-11. Quanto à limitação superior das armaduras transversais, o número de vigas que ultrapassa este limite é superior ao número de vigas que ultrapassa o mesmo limite no código ACI 318R-89 [1]. Conclui-se, assim, que o código ACI 318R-11 restringe muito mais a armadura transversal do que o código ACI 318R-89 [1]. Para as vigas que não cumprem este limite, o código prevê uma rotura do tipo frágil por compressão do betão nas escoras, o que não é verificado. O motivo é o mesmo que o enunciado no código ACI 318R-89 [1].

Em relação à limitação inferior da área de armadura longitudinal, o novo código não é tao restritivo quando comparado com o ACI 318R-89 [1]. O Quadro 5.2 mostra que apenas as vigas A1 [7], C1 [7] e C065a [23] não possuem a armadura requerida. No entanto, é observado o mesmo tipo de incongruências que as detetadas na avaliação do Quadro 5.1. Isto volta a dever-se à base empírica, utilizada nos dois códigos americanos, que está por detrás do

cálculo do valor limite da armadura longitudinal e por isso estas vigas devem ser encaradas com muita reserva.

Quanto ao limite superior do espaçamento entre cintas, o código em análise restringe um pouco mais que o código ACI 318R-89 [1].

5.2.3 Código Europeu MC90 [9]

O MC90 possui as seguintes limitações:

- área máxima de um ramo da armadura transversal: Eq. 3.33 (equação derivada a partir da limitação da tensão no betão comprimido das escoras);
- espaçamento máximo das cintas: $u_{ef}/8$;
- espaçamento máximo da armadura longitudinal: 35 cm;
- diâmetro mínimo da armadura longitudinal de canto: $s_t/16$.

À falta de disposições específicas relativas à torção, o MC90 remete para várias cláusulas gerais destinadas à flexão e ao esforço transversal, como é o caso da armadura mínima transversal de esforço transversal, a qual é indicada a Cláusula 9.2.2.2 do código e determinada pela Eq.3.37.

O Quadro V.6 do Anexo V resume as características das vigas de referência, em unidades do sistema internacional, necessárias para o cálculo dos vários parâmetros de controlo por forma a verificar as vigas segundo o MC90. Os significados de tais parâmetros foram já referidos ao longo da Secção 3.4. O parâmetro A_{ii} refere-se à área de armadura longitudinal existente na parede i de maior comprimento constituinte da viga.

O Quadro V.7 do Anexo V mostra, por sua vez, as verificações regulamentares do MC90 como é o caso da verificação do limite mínimo e máximo para a armadura transversal ($A_{t,min}/s$ e $A_{t,max}/s$, respetivamente) relativamente à armadura transversal efetiva ($A_{t,ef}/s$), da verificação do limite máximo para o espaçamento das cintas e dos varões longitudinais ($s_{t,max}$ e $s_{l,max}$, respetivamente) relativamente aos valores dos espaçamentos efetivos ($s_{t,ef}$ e $s_{l,ef}$, respetivamente) e da verificação do valor mínimo do diâmetro da armadura longitudinal ($\phi_{l,min}$) relativamente ao valor efetivo para o varão de canto ($\phi_{l,ef,canto}$).

O ângulo θ é calculado através da Eq.3.36. O cálculo da armadura transversal mínima é feito para uma parede i constituinte das vigas de referência. A taxa mínima de armadura ($\rho_{w,min}$) foi definida através da Tabela 9.2.1 pertencente ao comentário da Cláusula 9.2.2.2 do código MC90.

O Quadro 5.3 apresenta um resumo de todas as vigas que não verificam as limitações do código europeu.

Quadro 5.3 – Vigas que não cumprem as disposições do MC 90 [9]

Parâmetro	Vigas que não cumprem as disposições regulamentares
$A_{t,min}/s$	Todas cumprem.
$A_{t,max}/s$	B4, B5, B6, C4, C5, C6, D4, G5, I6, J2, J3, J4, K4, M4, M5, M6 [18]; VH2 [26]; A4 [27]; N-12-16, N-14-10 e N-20-20 [15]
$s_{t,max}$	B3, B7, B9, C4, G3, I3, J1, J3, M1, M3, N1, N1a, N2a e N4 [18]; B5UR1, B7UR1, B9UR1, B12UR1, B12UR2 e B14UR1 [24]; NBS-82-13 [13]; SWA-1 [29]
$s_{l,max}$	G3, G4, G5, G7, G8, K2 [18]
φ_{min}	VH1, VQ1, VQ3, VQ9, VS2-VQ2, VS9 e VU4 [26], NBS-82-13 [13], SW4-1 [29]

Em relação à limitação inferior da armadura transversal, todas as vigas cumprem o limite requerido. Quanto à limitação superior da área de armadura transversal, o Quadro 5.3 apresenta um número considerável de vigas que não cumpre este requisito, destacando-se as vigas de Hsu [18]. Segundo o MC90, estas vigas sofreram uma rotura frágil em torção por compressão do betão nas escoras, o que não é confirmado nas curvas $T - \theta$ experimentais.

Devido à influência da “cedência” do betão na ductilidade em torção, todas elas apresentam um intervalo de comportamento dúctil.

As vigas de Hsu [18] e de Koutchkali e Belarbi [24] destacam-se por ultrapassarem o limite máximo do espaçamento da armadura transversal. No entanto, a diferença entre o valor limite e o valor efetivo do espaçamento transversal é pequena para a maioria das vigas podendo, assim, serem aceites à luz do MC 90.

No que toca ao limite mínimo do diâmetro dos varões longitudinais de cantos ($\phi_{l,min,canto}$), as vigas de Leonhardt e Schelling [26] possuem varões com um diâmetro muito próximo ao diâmetro calculado, podendo ser aceites à luz do código em análise. Contudo para uma melhor segurança e desempenho da viga, estes varões deveriam ser substituídos por varões com o diâmetro standardizado a seguir As vigas NBS-82-13 [13] e SW4-1 [29] são as únicas que não cumprem este limite.

5.2.4 Código Europeu MC10 [10]

O MC10 incorpora poucas limitações para as vigas sujeitas à torção. O cálculo da área máxima de um ramo da armadura transversal é feito a partir da Eq.3.46 (equação derivada a partir do momento torsor resistente).

Na falta de disposições específicas relativas à torção, o MC10 remete para várias cláusulas gerais relativas à flexão e ao esforço transversal. A Eq.3.50 limita inferiormente a área da armadura transversal de corte.

O Quadro V.8 do Anexo V resume as características das vigas de referência que não foram apresentadas no Quadro V.6, necessárias para o cálculo dos vários parâmetros de controlo por forma a verificar as vigas segundo o MC10. Os significados de tais parâmetros foram já referidos ao longo da Secção 3.5. É de notar que o cálculo da espessura efetiva da parede é diferente entre os dois códigos modelos europeus MC90 e MC10. Dadas as poucas características suplementares apresentadas, o mesmo quadro apresenta também a verificação do limite mínimo e máximo para a armadura transversal ($A_{t,min}/s$ e $A_{t,max}/s$ respetivamente) relativo à armadura transversal efetiva ($A_{t,ef}/s$) segundo o código MC10.

O Quadro 5.4 apresenta um resumo de todas as vigas que não verificam as limitações do código europeu.

Quadro 5.4 - Vigas que não cumprem as disposições do MC 10 [10]

Parâmetro	Vigas que não cumprem as disposições regulamentares
$A_{t,min}/s$	Todas cumprem.
$A_{t,max}/s$	B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, C4, C5, C6, G3, D3, D4 G4, G5, G7, G8, I3, I4, I5, I6, J1, J2, J3, J4, K2, K3, K4, M1, M2, M3, M4, M5, M6, N1, N1a, N2, N2a, N3 e N4 [18]; VB2, VB3, VB4, VH2, VM1, VM2, VM3, VQ1, VQ3, VQ9, VS2-VQ2, VS3, VS4-VQ5, VS9, VS10-VB1, VU1, VU2, VU3 e VU4 [26]; A2, A3, A4, B3 e B4 [27]; B5UR1, B7UR1, B12UR3, B12UR4 e B12UR5 [24]; H-06-12, H-07-10, H-07-16, H-12-12, H-12-16, H-14-10, H-20-20, N-06-06, N-06-12, N-07-10, N-07-16, N-12-12, N-12-16, N-14-10 e N-20-20 [15]; NBS-43-44 e NBS-82-13 [13]; SW4-1 [29]; T0, T1 e T2 [25]; A3, A4, A5, B3, B4, B5, C3, C4, C5 e C6 [7]; B065b, B080a [23]

Em relação à limitação inferior da armadura transversal, todas as vigas cumprem este critério. Já no limite máximo de armadura transversal, para as vigas que ultrapassam este

limite esperar-se-ia uma rotura frágil através do betão, por possuírem armadura em excesso. No entanto tal não se verifica nas curvas $T - \theta$ experimentais das referidas vigas devido à observação de uma ductilidade conferida pela “cedência” do betão.

5.2.5 Código Europeu EC2 [11]

O código europeu EC2 incorpora as seguintes limitações:

- área máxima de um ramo da armadura transversal: Eq.3.56 (equação derivada a partir do momento torsor resistente);
- espaçamento máximo das cintas: $u_k/8$;
- espaçamento máximo da armadura longitudinal: 35 cm.

À falta de disposições específicas relativas à torção, e à semelhança dos códigos europeus analisados anteriormente, o EC2 remete para várias cláusulas gerais relacionadas com a flexão e o esforço transversal, como é o caso da armadura mínima transversal de esforço transversal, a qual é indicada na Cláusula 5.4.2.2 do código e determinada pela Eq.3.58.

O Quadro V.9 do Anexo V resume as características das vigas de referência, não referidas nos Quadros V.6 e V.8, necessárias para o cálculo dos vários parâmetros de controlo por forma a verificar as vigas segundo o EC2. Os significados de tais parâmetros vêm referidos ao longo da secção 3.6. É de notar que a verificação das dimensões da secção transversal das vigas é semelhante à verificação feita pelo código MC90. O ângulo θ é calculado através da Eq.3.57.

Dadas as poucas características suplementares apresentadas, o Quadro V.9 resume também as verificações efetuadas com base no EC2. As verificações relativas ao espaçamento máximo das cintas e ao espaçamento máximo da armadura longitudinal ($s_{t,m\acute{a}x}$ e $s_{l,m\acute{a}x}$, respetivamente) são iguais às verificações do código MC 90 [9] não sendo assim repetidas no Quadro V.9.

O Quadro 5.5 faz um resumo de todas as vigas que não verificam as limitações do código europeu.

Quadro 5.5 - Vigas que não cumprem as disposições do EC2 [11]

Parâmetro	Vigas que não cumprem as disposições regulamentares
$A_{t,min}/s$	Todas cumprem.
$A_{t,max}/s$	B5, B6, C5, C6, J3, J4, K4, M5, M6 [18]; VH2 [26]; N-20-20 [15]
$s_{t,max}$	B3, B7, B9, C4, D3, G3, I3, J1, J3, M1, M3, N1, N1a, N2a e N4 [18]; B5UR1, B7UR1, B9UR1, B12UR1, B12UR2 e B14UR1 [15]; NBS-82-13 [13]; SWA-1 [29]
$s_{l,max}$	G3, G4, G5, G7, G8, K2 [18]

Em relação ao cálculo da armadura mínima transversal, todas as vigas cumprem este limite. Para vigas com taxa mais baixas de armadura, o EC2 prevê assim que estas possuem uma armadura suficiente para um bom desempenho das vigas.

Quanto à limitação superior da área de armadura transversal, as vigas de Hsu [18] são as que mais ultrapassam este limite. Segundo o EC2, estas vigas deveriam ter uma rotura frágil por compressão do betão nas escoras, o que não se verifica devido à observação de uma ductilidade conferida pela “cedência do betão. Este código é de todos o que menos restringe a armadura transversal.

5.2.6 Código Canadiano, CSA A23.3-04 [14]

O CSA A23.3-04 possui as seguintes limitações:

- área máxima de um ramo da armadura transversal: Eqs. 3.63 e 3.64 (equação derivada a partir da limitação da tensão no betão comprimido das escoras);
- diâmetro mínimo da armadura longitudinal de canto: $s_t/16$.
- espaçamento máximo das cintas: mínimo entre $0,35d_v$ e 30 cm.

À semelhança dos códigos anteriores, o CSA A23.3-04 remete para várias cláusulas gerais relacionadas com a flexão e o esforço transversal quando não existem disposições específicas para a torção. É o caso da armadura mínima transversal de esforço transversal para a qual o código remete para a Cláusula 11.2.8.2, sendo calculada pela Eq.3.67.

O Quadro V.10 do Anexo V resume as características das vigas de referência necessárias para o cálculo dos vários parâmetros de controlo por forma a verificar as vigas segundo o CSA A23.3-04. Os significados de tais parâmetros foram já referidos ao longo da Secção 3.7. O ângulo θ é determinado pela Eq.3.66.

O Quadro V.11 apresenta a verificação do limite mínimo e máximo para a armadura transversal ($A_{t,min}/s$ e $A_{t,max}/s$ respectivamente) relativo à armadura transversal efetiva ($A_{t,ef}/s$) e a verificação do limite máximo para o espaçamento das cintas ($s_{t,max}$) relativamente ao valor do espaçamento efetivo ($s_{t,ef}$). A verificação do valor mínimo do diâmetro da armadura longitudinal ($\phi_{l,min}$) é igual à realizada no código modelo MC90, pelo que não é repetida neste quadro.

O Quadro 5.6 apresenta um resumo de todas as vigas que não verificam as limitações do código canadiano.

Quadro 5.6 - Vigas que não cumprem as disposições do CSA A23.3-04 [14].

Parâmetro	Vigas que não cumprem as disposições regulamentares
$A_{t,min}/s$	VQ3 e VQ9 [26]; NBS-82-13 [13]; A1 e C1 [27]; A120a, B110a e C065a [23]
$A_{t,max}/s$	B3, B4, B5, B6, B8, B9, D4, C4, C5, C6, G4, G5, G8, I5, I6, J2, J3, J4, K3, K4, M3, M4, M5, M6 e N4 [18]; VH2, VS4-VQ5 e VS10-VB1 [26]; A4 e B4 [27]; H-20-20, N-07-16, N-12-12, N-12-16, N-14-10 e N-20-20 [15]; A5 e C6 [7]
$s_{t,max}$	Todas cumprem.
ϕ_{min}	VH1, VQ1, VQ3, VQ9, VS2-VQ2, VS9 e VU4 [26]; NBS-82-13 [13]; SWA-1 [29]

Em relação à limitação inferior das armaduras transversais são poucas as vigas que não cumprem o limite exigido. Contudo, das vigas que não cumprem o limite, apenas a viga C065a se afasta um pouco do valor exigido. Já em relação à limitação superior das armaduras transversais, as vigas de Hsu [18] são as que se destacam por possuírem mais área de armadura transversal do que a permitida pelo código. Mais uma vez isto leva a pressupor que, à luz do CSA A23.3-04, as vigas possuem uma rotura frágil em torção, o que não é confirmado nas curvas $T - \theta$ experimentais pelo mesmo motivo enunciado anteriormente para os restantes documentos normativos.

Quanto ao espaçamento máximo transversal ($s_{t,max}$), todas as vigas cumprirem este limite. As vigas de Leonhardt e Schelling [26] destacam-se das restantes vigas por não cumprirem o limite mínimo para o diâmetro da armadura longitudinal. Tal como tinha sido referido atrás, a não verificação da limitação em causa pode ser contrabalançada com os reduzidos espaçamentos efetivos da armadura transversal que a maioria das vigas apresenta.

5.3 Análise da Resistência à Torção

Nesta secção pretende-se comparar os valores normativos do momento torsor resistente, previstos pelos diversos documentos normativos analisados ao longo do trabalho, com os valores obtidos nos ensaios das vigas de referência. Este estudo é feito através da relação entre o momento torsor resistente experimental ($T_{r,exp}$) e o momento torsor resistente calculado segundo os documentos normativos ($T_{r,calc}$) em função da resistência média do betão à compressão (f_{cm}) de modo a identificar os códigos que melhor estimam a referida resistência.

5.3.1 Código Americano, ACI 318R-89 [1]

Como já foi referido no Cap.3 e para o caso da torção, o código americano ACI 318R-89 é baseado na teoria da flexão enviesada. Segundo este código, a resistência à torção para vigas retangulares cheias e vigas retangulares vazadas com espessura superior a $x/4$ é determinada pela Eq.3.7, enquanto que para vigas retangulares vazadas com espessura compreendida entre $x/10$ e $x/4$ a resistência é determinada pela Eq.3.7. É de referir que, para a utilização de ambas as equações, todos os parâmetros devem ser introduzidos com unidades imperiais.

Para vigas cuja rotura prevista é frágil, a resistência teórica deverá ser calculada para a tensão limite máxima permitida para o betão à compressão. Assim, caso a condição $T_s \leq 4T_c$ não seja verificada, a resistência teórica das vigas deve ser calculada através da Eq.3.3 com $T_s = 4T_c$.

Os Quadros VI.1, VI.2, VI.3 e VI.4 do Anexo VI resumem os cálculos efetuados para a determinação dos valores previstos da capacidade torsional ($T_n \equiv T_{r,calc}$) das vigas de referência, através das disposições do ACI 318R-89. Estes quadros apresentam também os valores experimentais do momento torsor resistente ($T_{r,exp}$) e a relação entre o valor do momento torsor resistente experimental e o correspondente valor teórico ($T_{r,exp}/T_{r,calc}$). As vigas de referência foram divididas pelos quadros consoante o tipo de secção (cheia e vazada) e o tipo de classe de resistência do betão à compressão (resistência normal e alta resistência). O objetivo desta separação foi diferenciar os resultados obtidos e verificar a adaptação das disposições normativas para cada grupo de vigas.

Com base nos valores das relações entre os parâmetros resistentes e para cada grupo de vigas foi ainda calculado o valor médio (\bar{x}), o desvio padrão amostral (s) e o coeficiente de variação (cv) para cada conjunto de valores obtidos para a relação $T_{r,exp}/T_{r,calc}$ (Eq.5.1, 5.2 e 5.2,

respetivamente). Nas Eq.5.2 e 5.3, n é o número de valores da amostragem, ou seja, o número de valores calculados para a relação $T_{r,exp}/T_{r,calc}$.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

$$cv = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (5.3)$$

O Quadro 5.7 apresenta um resumo das médias $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{\bar{x}}$, desvios padrões $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_s$ e coeficientes de variação $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{cv}$ obtidos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência.

Quadro 5.7 - Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Tipo de secção	Resistência do betão	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{\bar{x}}$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_s$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{cv}$
Cheia	Normal	1,126	0,195	17%
Cheia	Alta	1,109	0,221	20%
Vazada	Normal	1,413	0,388	27%
Vazada	Alta	1,156	0,072	6%

A Fig.5.1 apresenta graficamente a relação $T_{r,exp}/T_{r,calc}$ em função da resistência do betão (f_{cm}) para os resultados obtidos nos Quadros VI.1, VI.2, VI.3 e VI.4 do Anexo V-

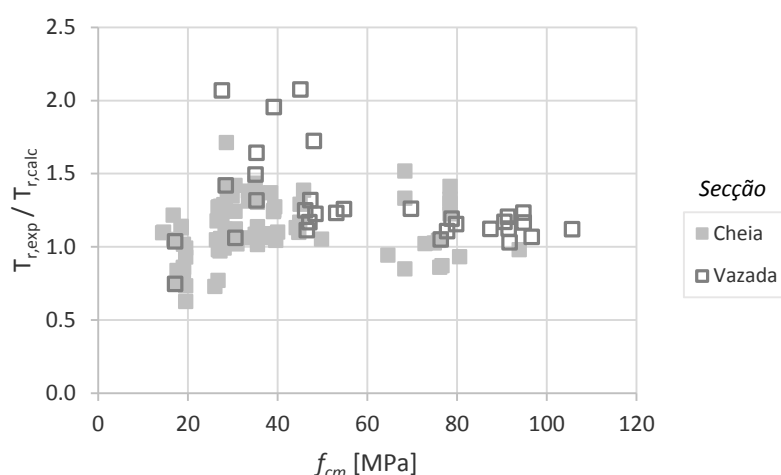


Fig.5.1 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do ACI 318R-89 [1].

Da observação da Fig.5.1, o código americano ACI 318R-89 aparenta, no geral, ser conservativo para o cálculo da resistência das vigas à torção. Porém, existem algumas vigas em que a previsão da resistência à torção foi sobrestimada. Tais vigas apresentam taxas de armadura baixas a moderadas. Contudo, apesar de o momento torsor experimental ser inferior ao momento calculado, as vigas mostraram um comportamento dúctil. Já a resistência teórica das vigas T0 [25], A120a e B065b [23] foi sobrestimada em cerca do dobro da resistência registrada nos ensaios. Estas vigas são constituídas por taxas de armadura baixas e moderadas, não existindo motivo aparente para apresentarem esta diferença de valores.

Na Fig.5.1 observa-se também que o ACI 318R-89 aparenta subestimar mais a capacidade resistente de vigas de secção vazada do que a resistência de vigas de secção cheia, designadamente para vigas de resistência normal. Além disso, para vigas de secção vazada, a tendência geral dos desvios aparenta passar por uma diminuição dos mesmos à medida que a resistência do betão à compressão aumenta, enquanto que para vigas de secção cheia tal tendência geral dos desvios parece ser fortemente menos acentuada.

Os valores estatísticos da relação entre momentos torsores resistentes (Quadro 5.7) ajudam a esclarecer as observações feitas tendo por base a Fig.5.1. No que toca a valores médios, o ACI 318R-89 subestima notoriamente a capacidade resistente das vigas de secções vazadas com betões de resistência normal em cerca de 41% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,41$), 28% a mais do que em vigas de secção cheia com o mesmo tipo classe de betão ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,13$). Para vigas de secções vazadas com betões de alta resistência, o ACI 318R-89 volta a subestimar a sua capacidade resistente mas apenas em 16% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,16$), 25% menos que as vigas de secção vazada com betões de resistência normal e 5% mais que em vigas de secção cheia com betões de alta resistência ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,11$). Já a diferença entre valores médios previstos de vigas de secção cheia com diferentes tipos classe de betão é muito menor do que em vigas de secção vazada, rondando apenas os 2%. Dos quatro grupos de vigas, as vigas vazadas com betões de alta resistência apresentam o menor coeficiente de variação ($cv = 6\%$). Note-se que, em geral, um limite máximo consensual do coeficiente de variação para se considerar que os resultados apresentam uma variabilidade bastante aceitável é de 10% [4]. Com exceção das vigas anteriormente referidas, todas as restantes apresentam uma dispersão de resultados notória. Designadamente, as vigas de secção vazada com betões de baixa resistência são as que apresentam o maior coeficiente de variação ($cv = 27\%$), ou seja, a maior dispersão de valores. Ainda assim, as tendências gerais anteriormente analisadas mantêm-se válidas.

À luz dos resultados desta secção, conclui-se que, no geral, o ACI 318R-89 está do lado da segurança na previsão do momento torsor resistente de vigas de betão armado à torção, apresentando no entanto desvios maiores para vigas de betões de resistência normal e desvios

mais pequenos para vigas de betões de alta resistência com ambos tipos de secções. Contudo para vigas de secção cheia, em especial vigas com betões resistência normal, o código aparenta não estar tanto do lado da segurança. Já para vigas vazadas com betões de alta resistência, o código apresenta valores mais ótimos para a resistência deste tipo de vigas.

5.3.2 Código Americano, ACI 318R-11 [2]

De modo diferente do ACI 318R-89 [1] e para o caso da torção pura, o código americano ACI 318R-11 é baseado na analogia da treliça espacial. Segundo este código, a resistência à torção para vigas retangulares cheias e vazadas é determinada pela Eq.3.20, cujo ângulo θ é conhecido através da resolução da Eq.3.22. Novamente, para a utilização da Eq.3.20 todos os parâmetros devem ser introduzidos com unidades imperiais.

Para vigas cuja rotura prevista é frágil, a resistência teórica para estas vigas deverá ser calculada para a tensão limite máxima permitida para o betão à compressão. Assim, caso a condição da Eq.3.17 não verifique, a resistência teórica ($T_n \equiv T_{r,calc}$) deverá ser calculada através da Eq.3.17, tomando $T_u = T_n$. Se a espessura da parede de uma secção vazada for inferior a A_{oh}/p_h , o primeiro termo da Eq.3.17 deverá ser substituído por $T_u/(1,7A_{oh}t)$.

Os Quadros VI.5, VI.6, VI.7 e VI.8 do Anexo VI resumem os cálculos efetuados para a determinação dos valores previstos da capacidade torsional das vigas de referência, através das disposições do ACI 318R-11. Cada quadro separa as vigas consoante o tipo de secção e o tipo de classe de resistência do betão à compressão.

O Quadro 5.8 apresenta um resumo das médias $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{\bar{x}}$, desvios padrões $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{\bar{s}}$ e coeficientes de variação $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{cv}$ obtidos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência.

Quadro 5.8 - Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (ACI 318R-11 [2])

Tipo de secção	Resistência do betão	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{\bar{x}}$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{\bar{s}}$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{cv}$
Cheia	Normal	1,406	0,379	27%
Cheia	Alta	1,224	0,254	21%
Vazada	Normal	1,435	0,294	20%
Vazada	Alta	1,360	0,191	14%

A Fig.5.2 apresenta graficamente a relação $T_{r,exp}/T_{r,calc}$ em função da resistência do betão (f_{cm}) para os resultados obtidos nos Quadros VI.5, VI.6, VI.7 e VI.8 do Anexo VI.

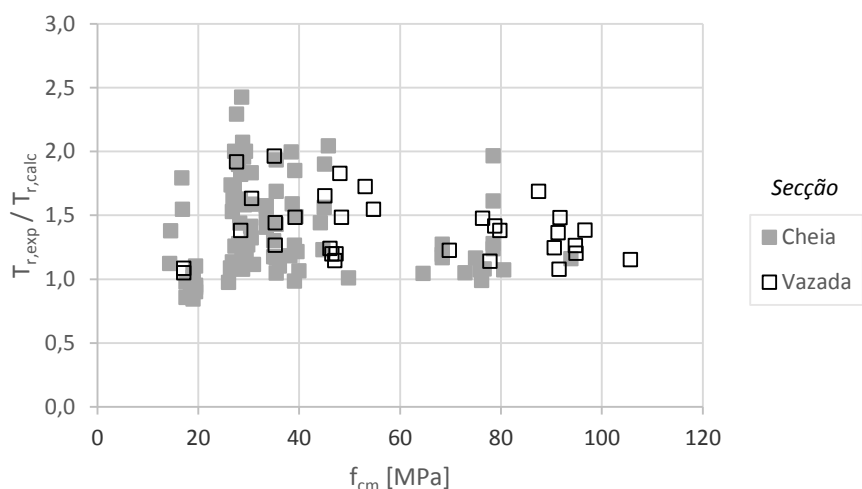


Fig.5.2 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do ACI 318R-11 [2].

À semelhança do ACI 318R-89 [1], o código ACI 318R-11 subestima a capacidade de resistente das vigas em estudo mas este é claramente mais conservativo do que o código anterior. Em alguns casos, o código volta a sobrestimar a resistência à torção. Todas as vigas cuja resistência foi sobrestimada são vigas de secção cheia e apresentam baixas taxas de armadura bem como um comportamento dúctil. As previsões das resistências destas vigas não se encontram do lado da segurança. Já as vigas cujas resistências foram subestimadas, o código em análise exagera a sua previsão para um maior número de vigas em estudo do que as observadas no ACI 318R-89 [1], em especial para vigas de secção cheia com betões de resistência normal. Estas previsões estão exageradamente do lado da segurança.

Na Fig. 5.2 é também observada uma grande dispersão dos pontos, tanto para vigas de betões de resistência normal como para vigas de betões de alta resistência. Esta dispersão é causada pela diferença de taxas de armaduras, sendo que as vigas com taxas de armadura elevadas geram maiores desvios. Apesar da dispersão notável de pontos, a tendência geral para a relação entre os valores experimentais e teóricos da resistência das vigas à torção é idêntica à tendência observada no código ACI 318R-89 [1].

Para esclarecer as observações feitas na Fig.5.2 é feita de seguida uma análise dos valores estatísticos obtidos da relação entre momentos torsores resistentes (Quadro 5.8). Para vigas de secções vazadas com betões de resistência normal, o ACI 318R-10 subestima a sua capacidade resistente em cerca de 44% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,44$), 3% a mais do que em vigas de secção cheia com a mesma classe de betão ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,41$). Para vigas de secções vazadas com betões de alta resistência, o código volta a subestimar a sua capacidade

resistente em 36% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,36$), 8% menos que as vigas de secção vazada com betões de resistência normal e 14% mais que em vigas de secção cheia com betões de alta resistência ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,22$). Diferente do código ACI 318R-89 [1], a diferença entre valores médios previstos de vigas de secção cheia com diferentes tipos classe de betão é superior à das vigas de secção vazada, rondando os 19%. Desta vez, nenhum dos quatro grupos de vigas apresenta um valor de coeficiente de variação ótimo. Todos os valores do coeficiente de variação apresentam dispersões notáveis sendo que as vigas de secção vazada com betões de alta resistência possuem a menor dispersão de valores ($cv = 14\%$) e as vigas de secção cheia com betões de resistência normal possuem a maior dispersão de valores ($cv = 27\%$).

À luz dos resultados desta secção, conclui-se que o ACI 318R-11 é mais conservativo do que o ACI 318R-89 [1] e apresenta uma melhoria significativa da previsão da resistência de vigas de secção cheia. No entanto, os desvios apresentados por este código são maiores do que os desvios apresentados no código anterior, em especial para vigas com taxas de armadura elevadas.

5.3.3 Código Europeu, MC90 [9]

O código europeu MC90 define a resistência à torção (T_r) de uma viga como sendo o menor valor das resistências T_{Rcwi} e T_{Rtwi} obtidas através da força de compressão resistente (F_{Rcwi}) e da força transversal resistente (F_{Rtwi}), respetivamente, e relativas a uma parede i que compõem a viga tubular equivalente. O momento torsor resistente T_{Rcwi} obtém-se a partir da Eq.3.27 igualando $T_{Sd} = T_{Rcwi}$ e $V_{Sdi,t} = V_{Rdi,t} = F_{Rcwi} \sin \theta_i$ (pela Eq.3.31) e em que F_{Rcwi} é calculado através da Eq.3.32. O momento torsor resistente T_{Rtwi} obtém-se a partir da Eq.3.27 igualando $T_{Sd} = T_{Rcwi}$ e $V_{Sdi,t} = V_{Rdi,t} = F_{Rtwi}$ e em que F_{Rtwi} é calculado através da Eq.3.35. O ângulo θ é calculado através da Eq.3.36.

No caso de vigas com rotura frágil, a resistência teórica deverá ser calculada apenas com base na força F_{Rcwi} . Note-se que, ao determinar o valor mínimo das resistências obtidas a partir de F_{Rcwi} e F_{Rtwi} , está implícita a separação teórica entre vigas que possuem uma rotura dúctil de vigas que possuem uma rotura frágil.

Os Quadros VI.9, VI.10, VI.11 e VI.12 do Anexo VI resumem os cálculos efetuados para a determinação dos valores previstos da capacidade torsional das vigas de referência, através das disposições do MC90. Cada quadro separa as vigas consoante o tipo de secção e o tipo de classe de resistência do betão à compressão.

O Quadro 5.9 apresenta um resumo das médias $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_x$, desvios padrões $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_s$ e coeficientes de variação $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{cv}$ obtidos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência.

Quadro 5.9 – Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (MC90 [9])

Tipo de secção	Resistência do betão	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_x$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_s$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{cv}$
Cheia	Normal	0,990	0,212	21%
Cheia	Alta	0,800	0,132	17%
Vazada	Normal	1,098	0,260	24%
Vazada	Alta	0,856	0,129	15%

A Fig.5.3 apresenta graficamente a relação $T_{r,exp}/T_{r,calc}$ em função da resistência do betão (f_{cm}) para os resultados obtidos nos Quadros VI.9, VI.10, VI.11 e VI.12 do Anexo VI.

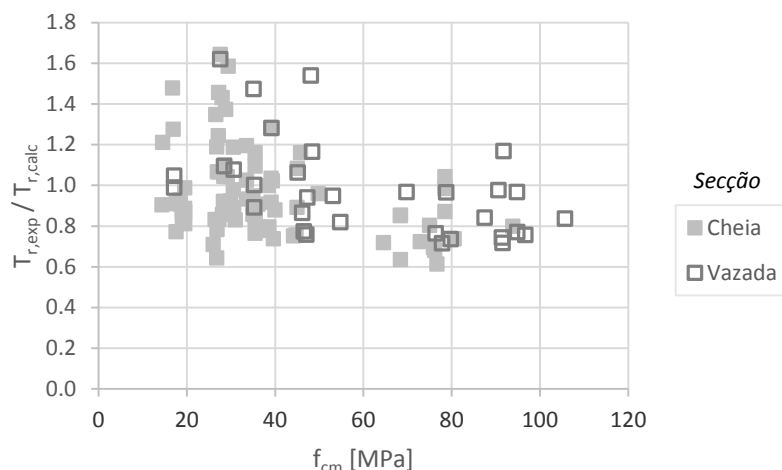


Fig.5.3 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do MC90 [9].

Ao contrário dos códigos americanos, o código europeu MC90 é mais conservativo para vigas de secção cheia do que para vigas de secção vazada. Nalguns casos, o código sobrestima a resistência as vigas. As vigas cuja resistência prevista foi sobrestimada são, na sua maioria, vigas de secção cheia que apresentam taxas de armadura baixas a moderadas e um comportamento dúctil. Estas previsões não estão do lado da segurança. Já as vigas cujas resistências foram subestimadas são, na sua maioria, vigas de secção cheia com betões de resistência normal com taxas de armadura variável. Estas previsões estão, em alguns casos, exageradamente do lado da segurança.

Na Fig. 5.3 é observada uma dispersão de pontos mais pequena que a observada nos códigos americanos. A tendência geral dos desvios para os dois tipos de secção passa, novamente, por uma aparente diminuição dos mesmos à medida que a resistência do betão à compressão aumenta. Vigas com baixas taxas de armaduras tendem a apresentar valores $T_{r,exp}/T_{r,calc}$ inferiores à unidade enquanto que vigas com taxas de armadura elevadas tendem a apresentar desvios maiores e com valores acima da unidade.

Os valores estatísticos da relação entre momentos torsores resistentes (Quadro 5.9) esclarecem novamente as observações feitas na Fig.5.3. Para vigas de secções vazadas com betões de resistência normal, o MC90 subestima a sua capacidade resistente em cerca de 10% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,10$), 10% a mais do que em vigas de secção cheia com o mesmo tipo classe de betão ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,99$). Ao contrário dos códigos americanos, para vigas de secções vazadas com betões de alta resistência, o código subestima a sua capacidade resistente em 14% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,86$), não estando do lado da segurança. Para vigas de secção cheia com betões de alta resistência, o código também subvaloriza a capacidade resistente das vigas em cerca de 20% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,80$). A diferença entre valores médios previstos de vigas de secção cheia com diferentes tipos classe de betão é cerca de 19%. Quanto ao coeficiente de variação, nenhum dos quatro grupos de vigas apresenta um valor de coeficiente de variação ótimo. Todos eles apresentam dispersões notáveis sendo que as vigas de secção vazada com betões de alta resistência apresentam a menor dispersão de valores ($cv = 15\%$) e as vigas de secção vazada com betões de resistência normal apresentam a maior dispersão de valores ($cv = 24\%$).

À luz dos resultados nesta secção conclui-se que, apesar de que, no geral, o MC90 se encontra do lado da segurança. No entanto, comparativamente aos códigos americanos, o MC90 é, no geral, menos conservativo.

5.3.4 Código Europeu, MC10 [10]

Para vigas de secção cheia, o código europeu MC10 limita a resistência à torção (T_r) de uma viga através da Eq.3.45. Já para vigas de secção vazada, Para tal substitui-se $V_{Ed,i}$ na Eq.3.38 por V_R ou $V_{Rd,max}$ e o menor valor desses dois momentos, passa a ser o momento de calculo das vigas vazadas. O ângulo θ é determinado pela Eq.3.47.

Os Quadros VI.13, VI.14, VI.15 e VI.16 do Anexo VI resumem os cálculos efetuados para a determinação dos valores previstos da capacidade torsional das vigas de referência, através das disposições do MC10. Cada quadro separa as vigas consoante o tipo de secção e o tipo de classe de resistência do betão à compressão.

O Quadro 5.10 apresenta um resumo das médias $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_x$, desvios padrões $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_s$ e coeficientes de variação $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{cv}$ obtidos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência.

Quadro 5.10 – Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (MC10 [10])

Tipo de secção	Resistência do betão	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_x$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_s$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{cv}$
Cheia	Normal	1,255	0,331	26%
Cheia	Alta	0,765	0,332	43%
Vazada	Normal	0,636	0,244	38%
Vazada	Alta	0,516	0,163	32%

A Fig.5.4 apresenta graficamente a relação $T_{r,exp}/T_{r,calc}$ em função da resistência do betão (f_{cm}) para os resultados obtidos nos Quadros VI.13, VI.14, VI.15 e VI.16 do Anexo VI.

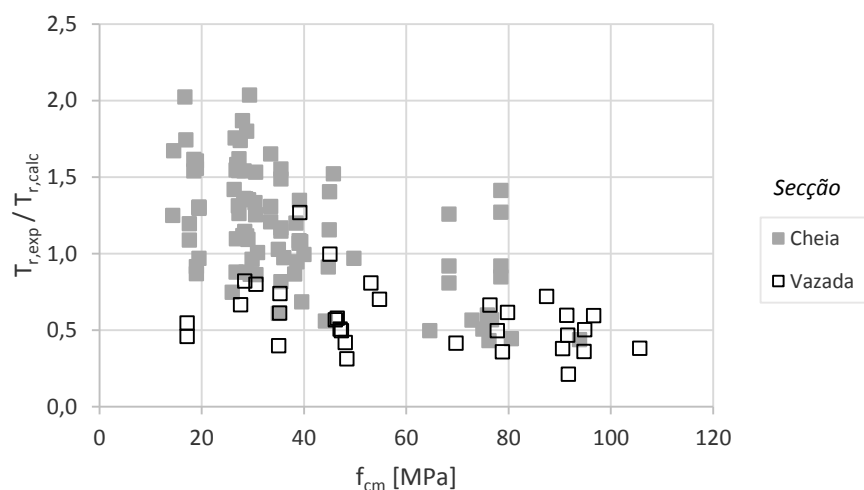


Fig.5.4 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do MC10 [10].

Da observação da Fig.5.4 e da análise dos resultados obtidos, é clara a desvalorização da capacidade resistente das vigas, em particular das vigas de secção vazada. Estas possuem uma ampla gama para a taxa de armadura e apresentam um comportamento dúctil. Estas previsões não estão do lado da segurança. Por outro lado, o código sobrestima mais a resistência das vigas de secção cheia com betões de resistência normal. As taxas de armadura destas vigas são na maioria taxas elevadas e apresentam comportamento dúctil. Para muitas destas vigas, as previsões estão exageradamente do lado da segurança.

Na Fig. 5.4 é observado uma dispersão notável de pontos, sobretudo para as vigas de resistência normal. A tendência da dispersão de pontos mantém-se em relação aos códigos anteriores.

Para esclarecer as observações feitas na Fig.5.4 é feita de seguida uma análise dos valores estatísticos obtidos da relação entre momentos torsores resistentes (Quadro 5.10). Para vigas de secções vazadas com betões de resistência normal, o MC10 sobrestima a sua capacidade resistente em cerca de 36% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,64$), 62% menos que o valor de resistência previsto para vigas de secção cheia com o mesmo tipo classe de betão ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,26$). Para vigas de secções vazadas com betões de alta resistência, o código volta a sobrestimar a sua capacidade resistente em 48% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,52$), 10% menos que as vigas de secção vazada com betões de baixa resistência e 23% mais que em vigas de secção cheia com betões de alta resistência ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,77$). A diferença entre valores médios previstos de vigas de secção cheia com diferentes tipos classe de betão é muito maior do que entre vigas de secção vazada e ronda os 50%. Os quatro grupos de vigas apresentam um coeficiente de variação notável, confirmando a dispersão observada na Fig. 5.4. As vigas de secção cheia com betões de resistência normal têm a menor dispersão de valores ($cv = 26\%$) enquanto que as vigas de secção cheia com betões de alta resistência possuem a maior dispersão de valores ($cv = 43\%$).

À luz dos resultados nesta secção conclui-se que, para além da notável dispersão de resultados, o MC10 tende a subestimar a resistência à torção de secções vazadas, independentemente da classe de resistência do betão. Para as secções cheias, observa-se uma grande dispersão de resultados, com diversas vigas cuja resistência é notavelmente sobrestimada ou subestimada.

5.3.5 Código Europeu, EC2 [11]

O código limita a resistência das vigas através do menor valor dos momentos torsores resistentes obtidos pelas forças de corte entre V_R (soma das Eqs. 3.41 e 3.42) e $V_{Rd,m\acute{a}x}$ (Eq.3.43). Obtido o momento torsor através da Eq.3.49, compara-se esse valor com o momento torsor máximo permitido pelo código (Eq.3.53). O ângulo θ é calculado através da Eq.3.55.

Os Quadros VI.17, VI.18, VI.19 e VI.20 do Anexo VI resumem os cálculos efetuados para a determinação dos valores previstos da capacidade torsional das vigas de referência, através das disposições do EC2. Cada quadro separa as vigas consoante o tipo de secção e o tipo de classe de resistência do betão à compressão.

O Quadro 5.11 apresenta um resumo das médias $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_x$, desvios padrões $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_s$ e coeficientes de variação $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{cv}$ obtidos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência.

Quadro 5.11 - Médias para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento torsor resistente das vigas de referência (EC2 [11])

Tipo de secção	Resistência do betão	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_x$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_s$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{cv}$
Cheia	Normal	1,093	0,201	18%
Cheia	Alta	1,096	0,138	13%
Vazada	Normal	1,139	0,445	39%
Vazada	Alta	0,908	0,175	19%

A Fig.5.5 apresenta graficamente a relação $T_{r,exp}/T_{r,calc}$ em função da resistência do betão (f_{cm}) para os resultados obtidos nos Quadros VI.17, VI.18, VI.19 e VI.20 do Anexo VI.

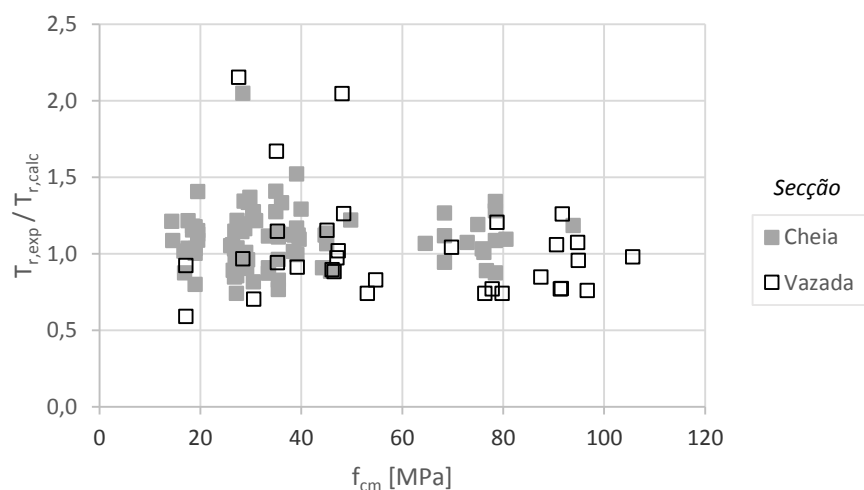


Fig.5.5 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do EC2 [11].

Pela análise dos resultados obtidos e da observação da Fig.5.5, no geral, o código europeu EC2 aparenta ser ligeiramente mais conservativo para as vigas de secção cheia do que para as vigas de secção vazada. Porém, existem alguns casos em que a previsão da resistência das vigas é notavelmente sobrestimada em ambos os tipos de secção. Estas previsões não estão do lado da segurança. As vigas cujas resistências foram subestimadas são, na sua maioria, vigas de secção cheia com betões de resistência normal e taxas de armadura baixas. Estas previsões estão do lado da segurança.

Na Fig. 5.5 é aparentemente observada uma dispersão de pontos mais pequena em vigas de secção cheia do que em vigas de secção vazada. A previsão da capacidade resistente feita pelo código EC2 para vigas de secção cheia é um pouco mais realista e próxima do valor unitário. A dispersão dos pontos aparenta tender a diminuir à medida que a resistência do betão aumenta, independentemente do tipo de secção.

Os valores estatísticos da relação entre momentos torsores resistentes (Quadro 5.11) esclarecem novamente as observações feitas na Fig.5.5. Para vigas de secções vazadas com betões de resistência normal, o EC2 subestima a sua capacidade resistente em cerca de 14% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,14$), 5% a mais do que em vigas de secção cheia com o mesmo tipo classe de betão ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,09$). Para vigas de secções vazadas com betões de alta resistência, o código passa a sobrestimar a sua capacidade resistente em apenas 9% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,91$), 23% a menos que as vigas de secção vazada com betões de baixa resistência e 19% menos que em vigas de secção cheia com betões de alta resistência ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 1,10$). A diferença entre valores médios previstos de vigas de secção cheia com diferentes tipos classe de betão é praticamente nula. Dos quatro grupos de vigas, os dois grupos constituídos por vigas de secção cheia apresentam coeficientes de variação mais aceitáveis enquanto que os grupos de vigas de secção vazada apresentam coeficientes maiores, ou seja, apresentam maior dispersão. As vigas de secção cheia com betões de alta resistência são as que apresentam o menor coeficiente de variação ($cv = 13\%$) enquanto que as vigas de secção vazada com betões de baixa resistência apresentam o maior coeficiente de variação ($cv = 39\%$).

À luz dos resultados nesta secção conclui-se que, no geral, e em comparação com os códigos europeus anteriores, o EC2 aparenta ser mais realista para o dimensionamento de vigas de betão armado à torção.

5.3.6 Código Canadiano, CSA A23.3-04 [14]

Segundo o código CSA A23.3-04, a resistência à torção para vigas retangulares cheias e vazadas é determinada pelo menor valor entre o momento torsor resistente (T_r) (Eq.3.59) e o momento resistente limitado pela tensão do betão (Eq.3.60) O ângulo θ é calculado através da Eq.3.64.

Os Quadros VI.21, VI.22, VI.23 e VI.24 do Anexo VI resumem os cálculos efetuados para a determinação dos valores previstos da capacidade torsional das vigas de referência, através das disposições do CSA A23.3-04. Cada quadro separa as vigas consoante o tipo de secção e o tipo de classe de resistência do betão à compressão.

O Quadro 5.12 faz um resumo das médias $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{\bar{x}}$, desvios padrões $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{\bar{s}}$ e coeficientes de variação $(T_{r,exp}/T_{r,calc})_{\bar{cv}}$ obtidos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento tursor resistente das vigas de referência.

Quadro 5.12 - Valores estatísticos para a relação entre os valores experimentais e teóricos do momento tursor resistente das vigas de referência (CSA A23.3-04 [14])

Tipo de secção	Resistência do betão	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{\bar{x}}$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{\bar{s}}$	$\left(\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}\right)_{\bar{cv}}$
Cheia	Normal	0,776	0,148	19%
Cheia	Alta	0,703	0,079	11%
Vazada	Normal	0,876	0,217	23%
Vazada	Alta	0,698	0,158	23%

A Fig.5.6 apresenta graficamente a relação $T_{r,exp}/T_{r,calc}$ em função da resistência do betão (f_{cm}) para os resultados obtidos nos Quadros VI.21, VI.22, VI.23 e VI.24 do Anexo VI.

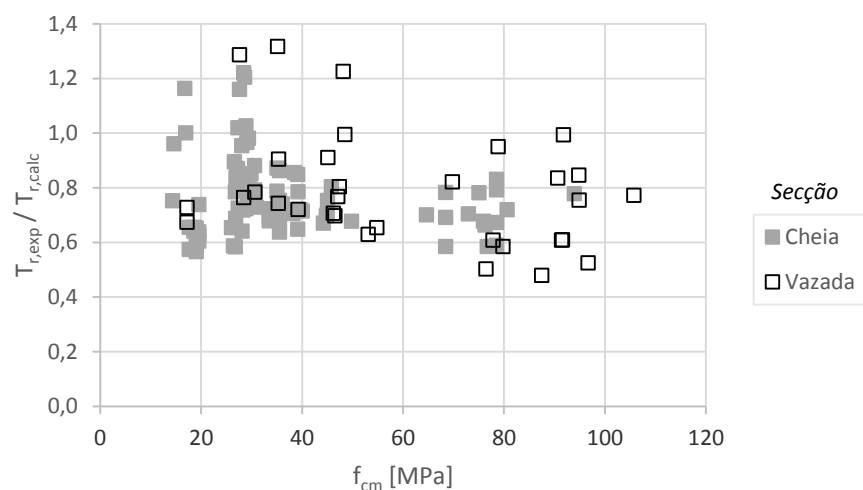


Fig.5.6 - Resistências experimentais comparadas com as previsões do CSA A23.3-04 [14].

A Fig.5.6 mostra uma grande dispersão de pontos. Para ambas as secções, o código tanto subestima como sobrestima a capacidade resistente das vigas. Para ambos tipos de secções, os desvios aparentam diminuir com o aumento da resistência do betão, embora com mais ênfase para as vigas com secção cheia.

Para esclarecer as observações feitas na Fig.5.6 é feita de seguida uma análise dos valores estatísticos obtidos da relação entre momentos torses resistentes (Quadro 5.12). Para vigas de secções vazadas com betões de resistência normal, o CSA A23.3-04 sobrestima a sua capacidade resistente em cerca de 12% $(T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,88)$, 10% a mais do que em vigas de

secção cheia com o mesmo tipo classe de betão ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,78$). Para vigas de secções vazadas com betões de alta resistência, o código volta a sobrestimar a sua capacidade resistente cerca de 30% ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,70$), 8% menos que as vigas de secção vazada com betões de baixa resistência e previsão praticamente idêntica com vigas de secção cheia com betões de alta resistência ($T_{r,exp}/T_{r,calc} \approx 0,70$). A diferença entre valores médios previstos de vigas de secção cheia com diferentes tipos classe de betão é inferior à das vigas de secção vazada, rondando os 7%. As vigas de secção vazada apresentam coeficientes de variação semelhantes. Os grupos de vigas de secção vazada são os que apresentam maior dispersão de pontos ($cv = 23\%$) e as vigas de secção cheia com betões de alta resistência são as que tem menos dispersão de pontos apresentam($cv = 11\%$).

À luz dos resultados nesta secção conclui-se que, o CSA A23.3-04 aparenta ser, em geral, não conservativo.

5.4 Análise da Limitação da Quantidade de Armaduras

Nesta secção pretende-se comparar os valores regulamentares das quantidades máximas e mínimas das armaduras de torção, impostas pelos diversos códigos e regulamentos analisados ao longo do trabalho, com as taxas efetivas utilizadas nas vigas de referência. Este estudo é feito através da análise do índice de ductilidade (μ_θ) em função, essencialmente, da taxa de armadura transversal (ρ), de modo a identificar os códigos que melhor garantem a ductilidade em torção. Assim pretende-se identificar um intervalo de taxas de armadura ideal para proporcionar uma rotura do tipo dúctil.

É sabido que taxas de armadura muito baixas geram roturas frágeis logo após a fissuração do betão e taxas exageradas de armadura geram roturas frágeis por esmagamento do betão nas escoras. De entre os códigos analisados, os códigos americanos são os únicos que limitam inferiormente as armaduras transversais e longitudinais com disposições específicas para a torção. Quanto à limitação máxima da armadura transversal de torção, todos os documentos normativos analisados neste trabalho limitam superiormente este tipo de armadura de uma forma explícita ou implícita. Neste último caso, é imposta uma tensão limite máxima para a tensão nas escoras de betão. Outro fenómeno que provoca rotura frágil é o destacamento dos cantos das vigas. Este fenómeno não é previsto pelos modelos subjacentes aos documentos normativos analisados e dificilmente pode ser prevista a exclusão de vigas com este tipo de fenómeno na rotura.

5.4.1 Código Americano, ACI 318R-89 [1]

O Quadro 5.1, relativo à verificação das vigas de referência com base no ACI 318R-89, mostrou que a viga VQ9 [26] não possui a armadura mínima exigida. No entanto, a diferença entre a área mínima exigida e a área efetiva da viga não é significativa. Assim, considerou-se que todas as vigas em estudo estão em concordância com o limite mínimo exigido pelo código em análise. Desta forma, o ACI 318R-89 não prevê uma rotura frágil por insuficiência de armadura para nenhuma viga em estudo.

Em relação à limitação superior da armadura transversal, o Quadro 5.1 mostrou que várias vigas ultrapassavam a área máxima de armadura transversal exigida pelo código, destacando-se deste grupo as vigas de Hsu [18]. Contudo, todas elas apresentam uma rotura mais ou menos dúctil. Conclui-se assim que o ACI 318R-89 não restringiu adequadamente o limite superior da armadura transversal de torção.

Em relação à limitação inferior da armadura longitudinal, o Quadro 5.1 também mostrou que algumas vigas de referência não cumprem este limite, em especial as vigas de Leonhardt e Schelling [26]. No entanto, tendo em conta os problemas associados aos valores mínimos regulamentares da armadura longitudinal de torção (comentados nas secções 5.2.1 e 5.2.2), as vigas que não cumprem este limite têm de ser encaradas com muita reserva.

Para a análise da limitação feita às taxas de armadura definidas pelo código ACI 318R-89, foram criados vários gráficos para uma análise qualitativa. Para isso, as vigas em estudo foram separadas por grupos de equilíbrio de “volumes” de armaduras ($m_{b,ef} = 1$ e $m_{b,ef} \neq 1$). Esta separação é justificada pelo facto de que, para vigas com armadura equilibrada, a limitação inferior da armadura transversal é considerada suficiente para evitar uma rotura frágil por insuficiência de armadura. O mesmo já não é garantido para vigas com armadura desequilibrada, tendo que ser exigida uma armadura mínima para ambos os tipos de armadura (transversal e longitudinal). Conhecendo de início os valores mínimos e máximos da área de armadura de torção, foram calculadas as taxas limites de armadura para cada viga através da Eq.4.2. Desses valores formaram-se várias séries com vigas de taxas de armaduras máxima semelhantes, afim de facilitar a identificação de vigas que ultrapassem o limite exigido pelo código. Note-se que os limites marcados nos gráficos são valores aproximados.

As figuras seguintes apresentam a evolução do índice de ductilidade de torção (μ_θ) das vigas de referência, calculados no Cap. IV deste trabalho, em função da taxa de armadura e independentes da resistência do betão. A Fig.5.7 apresenta a evolução do índice de ductilidade em vigas com armaduras equilibradas ($m_{b,ef} = 1$) em função da armadura

transversal (ρ_t). Já as Fig.5.8 e Fig.5.9 apresentam a evolução do índice de ductilidade em vigas com armaduras desequilibrada em função da armadura transversal (ρ_t) (Fig.5.8) e em função da armadura longitudinal (ρ_l) (Fig.5.9). Em cada figura estão representados os limites (linhas a tracejado) dos intervalos obtidos para as taxas mínimas (a cinza) e máximas (coloridas) da armadura de torção, tendo por base o código ACI 318R-89. Quanto às vigas, estas estão agrupadas em séries com valores aproximados do limite máximo da taxa de armadura a que cada viga é restrita pelo código. Este agrupamento justifica-se com o número reduzido de vigas que não cumprem o limite mínimo de armadura e serem assim mais fáceis de identificar. Através dos marcadores preenchidos e vazios dos gráficos, é ainda feita a distinção entre vigas de secção cheia e vazada (respetivamente). Os Quadros VII.1 e VII.2 do Anexo VII apresentam os valores limites obtidos (segundo o código ACI 318R-89) para a taxa de armadura de vigas com armadura equilibrada e vigas com armadura não equilibrada (respetivamente).

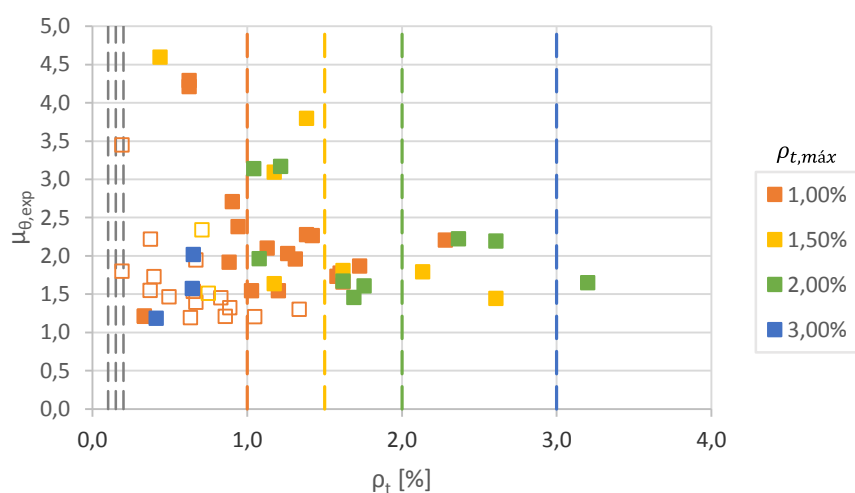


Fig.5.7 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (ACI 318R-89 [1]) - vigas com armadura equilibrada.

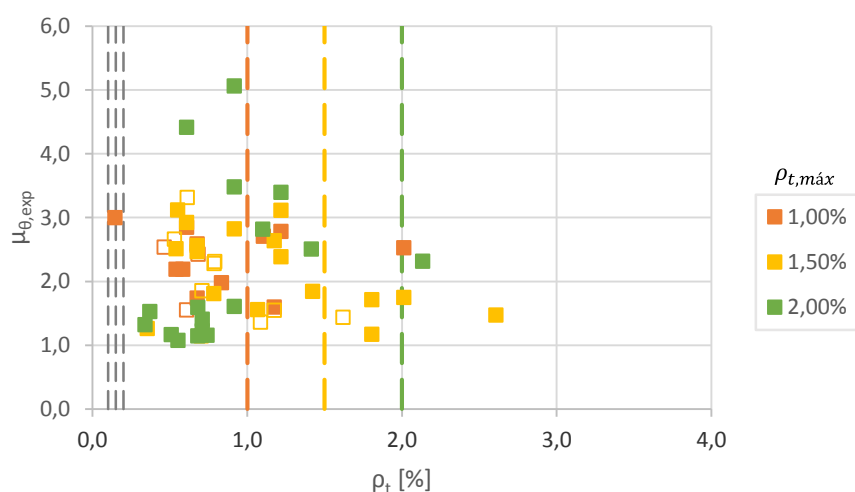


Fig.5.8 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (ACI 318R-89 [1]) - vigas com armadura não equilibrada.

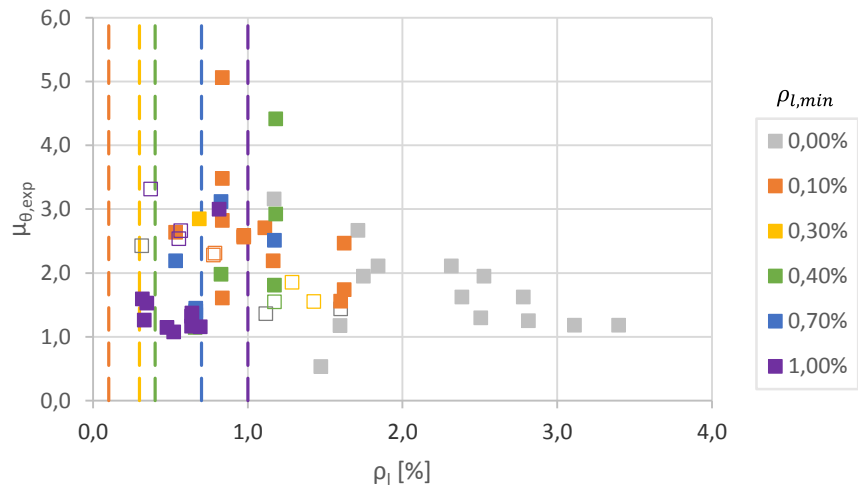


Fig.5.9 - Intervalos das taxas mínimas para a armadura longitudinal de torção (ACI 318R-89 [1]) - vigas com armadura não equilibrada.

No gráfico das vigas com armadura equilibrada (Fig. 5.7), é notório o incumprimento do limite máximo de armadura por parte das vigas de secção cheia. No entanto, estas vigas apresentam um índice de ductilidade superior à unidade contrariando, assim, a previsão de uma rotura frágil por compressão do betão nas escoras feita pelo código. Quanto às vigas de secção vazada, estas concentram-se, no geral, dentro do intervalo definido pelo código. Tal como o código prevê, estas vigas possuem um comportamento dúctil.

No gráfico das vigas com armadura desequilibrada cuja ductilidade está apresentada em função da taxa de armadura transversal (Fig. 5.8). As observações a fazer são idênticas às anteriores. De entre as vigas que não cumprem o limite máximo, destacam-se as vigas de secção cheia. Porém, estas vigas possuem um índice de ductilidade superior à unidade, contrariando a previsão de uma rotura frágil. Quanto às vigas de secção vazada, na sua maioria, encontram-se dentro do intervalo de armadura definido pelo código com um índice de ductilidade superior à unidade.

Em relação ao gráfico de vigas com armadura desequilibrada cuja ductilidade está apresentada em função da taxa de armadura longitudinal (Fig. 5.9), com exceção da série $\rho_{l,min} = 1,00\%$, no geral todas as vigas cumprem o limite mínimo de armadura longitudinal exigido pelo código. Segundo a Fig.5.9, as vigas da série $\rho_{l,min} = 1,00\%$ não têm armadura suficiente para um comportamento dúctil, no entanto o índice de ductilidade destas vigas é superior à unidade. Foi verificado que estas vigas pertencem aos autores Leonhardt e Schelling [26]. No Cap.4 as referidas vigas mostraram ser problemáticas aquando da análise do índice de ductilidade em função das variáveis de estudo. Foi constatado que as curvas $T - \theta$ destas vigas aparentavam mostrar um registo incompleto dos ensaios. Aparentemente estes

registos foram interrompidos imediatamente após a rotura das vigas, uma vez que tais curvas não apresentavam qualquer ramo descendente. Posto isso, e tal como no capítulo anterior, os resultados destas vigas devem ser encarados com muita reserva.

Nos três casos, a ductilidade de vigas que não cumprem os limites de armadura exigidos pelo código em análise justifica-se com a influência da “cedência” do betão na ductilidade da viga. Este aspeto não é considerado pelo código na limitação das armaduras de torção.

5.4.2 Código Americano, ACI 318R-11 [2]

O Quadro 5.2, relativo à verificação das vigas de referência com base no ACI 318R-11, mostrou que a viga VQ9 [26] não possui a armadura mínima exigida. No entanto, a diferença entre a área mínima exigida e a efetiva da viga volta a não ser significativa. Assim, considerou-se que todas as vigas em estudo estão em concordância com o limite mínimo exigido pelo código em análise. Desta forma, o ACI 318R-11 não prevê uma rotura frágil por insuficiência de armadura para nenhuma viga em estudo.

No que toca à limitação superior da armadura transversal, o Quadro 5.2 mostrou que o código em análise restringe mais superiormente a área de armadura transversal do que o código ACI 318R-89. Contudo, todas as vigas que ultrapassam este limite apresentam uma rotura mais ou menos dúctil. Conclui-se assim que o ACI 318R-11 não restringiu adequadamente o limite superior da armadura transversa de torção.

Em relação à limitação inferior da armadura longitudinal, o Quadro 5.2 também mostra que algumas vidas de referência não cumprem este limite. Porém, tendo em conta os problemas associados aos valores mínimos regulamentares da armadura longitudinal de torção (comentados nas secções 5.2.1 e 5.2.2), as vigas que não cumprem este limite têm de ser encaradas com muita reserva.

Para a análise da limitação feita às taxas de armadura definida pelo código ACI 318R-11, o estudo feito nesta secção é idêntico ao descrito na secção anterior.

As conclusões apontadas anteriormente podem ser confirmadas através das figuras seguintes que apresenta a evolução do índice de ductilidade de torção (μ_B) das vigas estudadas neste trabalho em função da taxa de armadura transversal (ρ_t), bem como os limites médios (linhas a tracejado) dos intervalos obtidos para taxas mínimas e máximas da armadura de torção, tendo por base o código ACI 318R-11. A Fig.5.10 é relativa às vigas com armadura equilibrada, enquanto que a Fig.5.11 é relativa às vigas com armadura não equilibrada. Já a Fig.5.12

apresenta a evolução do índice de ductilidade de torção (μ_θ) das vigas com armadura não equilibrada em função da taxa de armadura longitudinal (ρ_t). Os Quadros VII.3 e VII.4 do Anexo VII apresentam os valores limites obtidos (segundo o código ACI 318R-11) para a taxa de armadura de vigas com armadura equilibrada e vigas com armadura não equilibrada (respetivamente).

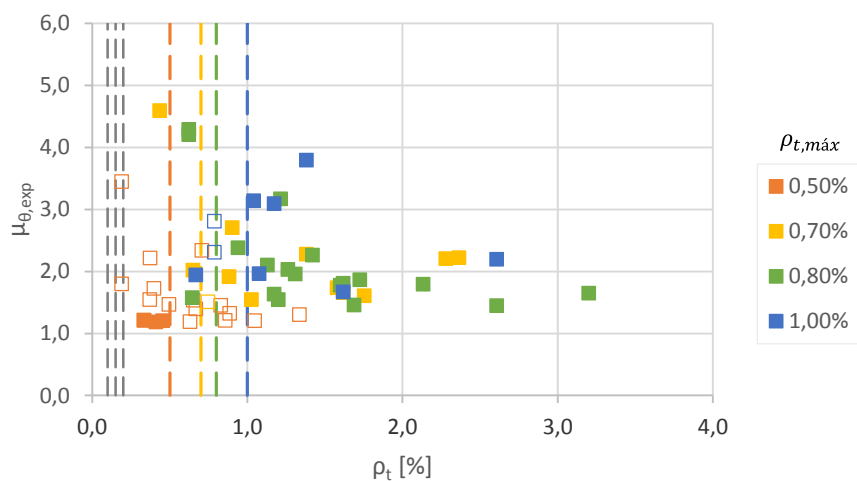


Fig.5.10 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (ACI 318R-11 [2]) - vigas com armadura equilibrada.

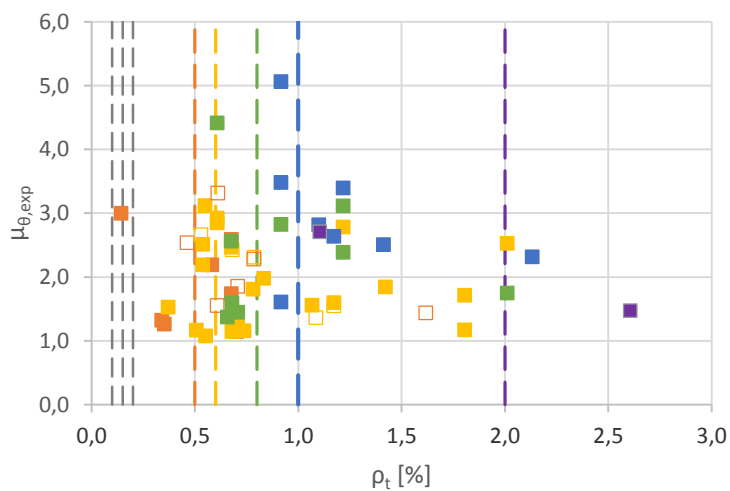


Fig.5.11 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (ACI 318R-11 [2]) - vigas com armadura não equilibrada.

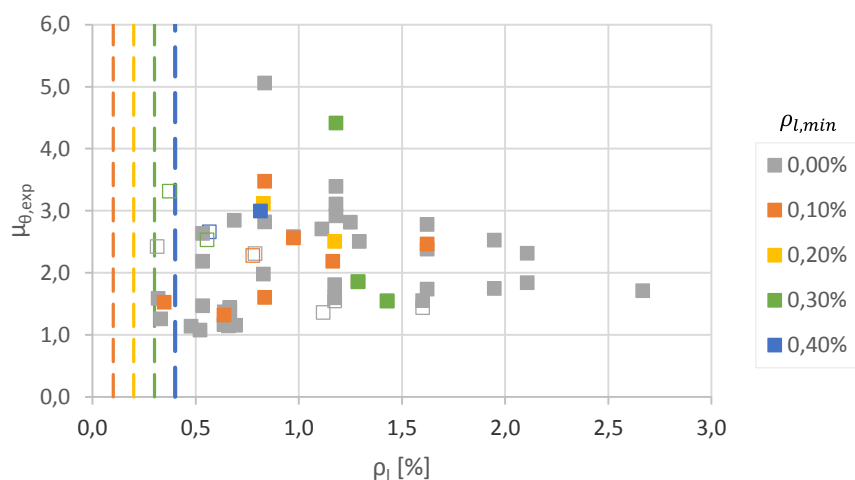


Fig.5.12 - Intervalos das taxas mínimas para a armadura longitudinal de torção (ACI 318R-11 [2]) - vigas com armadura não equilibrada.

No que toca à limitação da armadura, o ACI 318R-11 é muito mais restritivo comparativamente com o código ACI 318R-89 [1].

No gráfico das vigas com armadura equilibrada (Fig.5.10), volta a ser notório o incumprimento do limite máximo de armadura por parte das vigas de secção cheia. Desta vez, para a série $\rho_{t,max} = 0,50\%$, as vigas de secção vazada mostram não cumprir o limite imposto pelo código. Em ambos os casos, e tal como foi observado no código anterior, estas vigas apresentam um índice de ductilidade acima de 1 contrariando a previsão de uma rotura frágil por compressão do betão nas escoras.

No gráfico das vigas com armadura desequilibrada cuja ductilidade é apresentada em função da taxa de armadura transversal (Fig.5.11), as observações feitas voltam a ser idênticas às anteriores. De entre as vigas que não cumprem o limite máximo, destacam-se as vigas de secção cheia e as vigas de secção vazada com baixas taxas de armadura. Todas elas apresentam um índice de ductilidade superior a 1, contrariando a previsão de uma rotura frágil.

Em relação ao gráfico de vigas com armadura desequilibrada cuja ductilidade é apresentada em função da taxa de armadura longitudinal (Fig.5.11), todas as vigas cumprem o limite mínimo de armadura longitudinal exigido pelo código apresentando, assim, um comportamento dúctil.

Nos três casos, a ductilidade de vigas que não cumprem os limites de armadura exigidos pelo código em análise justifica-se novamente com a influência da “cedência” do betão na

ductilidade da viga. Este aspeto não é considerado pelo código na limitação das armaduras de torção.

5.4.3 Código Europeu, MC90 [9]

O Quadro 5.3, relativo à verificação das vigas de referência com base no MC90, mostrou que, no que toca à armadura mínima exigida pelo código, todas as vigas em estudo cumpriam esta verificação. Desta forma, o MC90 não prevê uma rotura frágil por insuficiência de armadura para nenhuma viga em estudo.

Em relação à limitação superior da armadura transversal, o Quadro 5.3 mostrou que o código em análise restringe muito menos o limite superior da área de armadura transversal em relação aos códigos americanos. As vigas que se destacaram por não respeitarem este limite foram as vigas de Hsu [18] e de Koutchkali e Belarbi [24]. Contudo, todas as vigas que ultrapassam este limite apresentam uma rotura mais ou menos dúctil. Conclui-se assim que o MC90 não restringe adequadamente o limite superior da armadura transversal de torção.

Dado este código não possuir disposições normativas que limitem a armadura longitudinal de torção, a análise da limitação é feita apenas com base na relação entre o índice de ductilidade das vigas e a taxa de armadura transversal. Daqui em diante, para os restantes códigos, a análise da limitação dos códigos será realizada apenas para a armadura transversal pelo mesmo motivo anteriormente referido.

As conclusões apontadas anteriormente podem ser confirmadas através da Fig.5.13 que apresenta a evolução do índice de ductilidade de torção (μ_θ) das vigas estudadas neste trabalho em função da taxa de armadura transversal (ρ_t), bem como os limites médios (linhas a tracejado) dos intervalos obtidos para taxas mínimas e máximas da armadura de torção, tendo por base o código MC90. Na Fig. 5.13, as vigas com diferentes equilíbrios de armaduras não são distinguidas ou separadas, dado o código em análise carecer de disposições específicas relativas à limitação da armadura longitudinal. O Quadro VII.5 do Anexo VII apresenta os valores limites obtidos (segundo o código MC90) para a taxa de armadura das vigas em estudo.

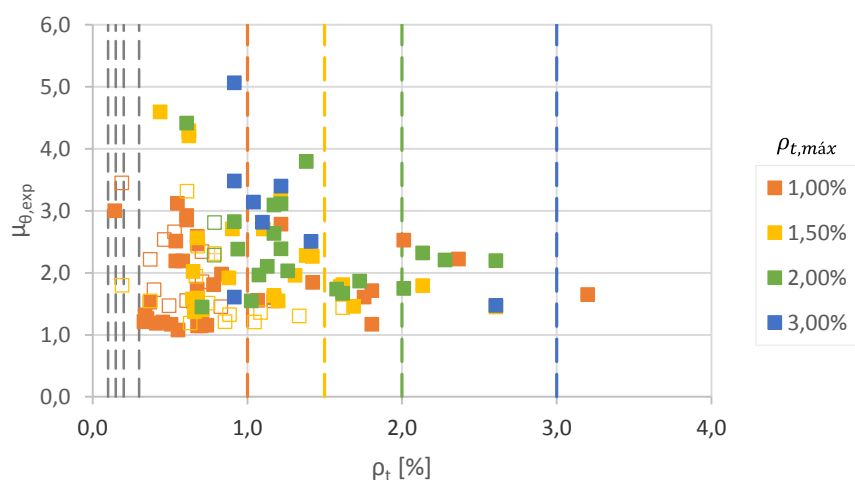


Fig.5.13 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (MC90 [9])

Na Fig.5.13, é notório o incumprimento do limite máximo de armadura por parte das vigas de secção cheia. Porém, estas vigas apresentam um índice de ductilidade maior do que 1, contrariando assim a previsão de uma rotura frágil por compressão do betão nas escoras por parte do código. Este facto justifica-se novamente com a influência da “cedência” do betão na ductilidade da viga, aspeto não considerado pelo código na limitação da armadura. Quanto às vigas de secção vazada, estas concentram-se, no geral, dentro do intervalo definido pelo código. Tal como o código prevê, estas vigas possuem um comportamento dúctil.

5.4.4 Código Europeu, MC10 [10]

O Quadro 5.4, relativo à verificação das vigas de referência com base no MC10, mostrou que, novamente, no que toca à armadura mínima exigida pelo código, todas as vigas em estudo cumpriam esta verificação. Desta forma, o MC10 não prevê uma rotura frágil por insuficiência de armadura para nenhuma viga em estudo.

Quanto à limitação superior da armadura transversal, o Quadro 5.4 mostrou que, comparativamente com o código MC90, o código em análise restringe muito mais superiormente a área de armadura transversal, destacando-se as vigas de secção cheia. Contudo, todas as vigas que ultrapassam este limite apresentam uma rotura mais ou menos dúctil. Conclui-se assim que o MC10 não restringe adequadamente o limite superior da armadura transversal de torção.

As conclusões apontadas anteriormente podem ser confirmadas através da Fig.5.14 que apresenta a evolução do índice de ductilidade de torção (μ_θ) das vigas estudadas neste trabalho em função da taxa de armadura transversal (ρ_t), bem como os limites médios (linhas

a tracejado) dos intervalos obtidos para taxas mínimas e máximas da armadura de torção, tendo por base o código MC10. O Quadro VII.6 do Anexo VII apresenta os valores limites obtidos (segundo o código MC10) para a taxa de armadura das vigas em estudo. Mais uma vez, o código em análise carece de disposições específicas relativas à limitação da armadura longitudinal.

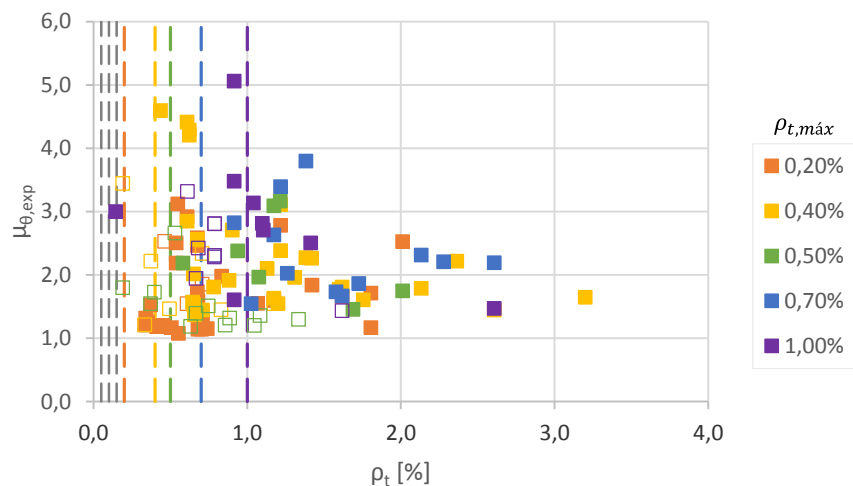


Fig.5.14 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (MC10 [10])

Na Fig.5.14, verifica-se mais uma vez o incumprimento do limite máximo de armadura por parte das vigas de secção cheia. Já a série $\rho_{t,máx} = 0,50\%$ destaca-se pelo incumprimento do limite superior da armadura por parte das vigas de secção vazada. No entanto, todas as vigas apresentam um índice de ductilidade maior que 1 contrariando, a previsão de uma rotura frágil por compressão do betão nas escoras por parte do código. Este facto justifica-se novamente com a influência da “cedência” do betão na ductilidade da viga, aspeto não considerado pelo código na limitação da armadura.

5.4.5 Código Europeu, EC2 [11]

O Quadro 5.5, relativo à verificação das vigas de referência com base no EC2, mostrou que, no que toca à armadura transversal mínima exigida pelo código, todas as vigas em estudo cumpriam esta verificação. Desta forma, o EC2 não prevê uma rotura frágil por insuficiência de armadura para nenhuma viga em estudo.

Quanto à limitação superior da armadura transversal, o Quadro 5.5 mostrou que, comparativamente com os códigos europeus, o EC2 é o código que menos restringe superiormente a área de armadura transversal. Porém, todas as vigas que ultrapassam este

limite apresentam uma rotura mais ou menos dúctil. Conclui-se assim que o EC2 não restringiu adequadamente o limite superior da armadura transversal de torção.

As conclusões apontadas anteriormente podem ser confirmadas através da Fig.5.15 que apresenta a evolução do índice de ductilidade de torção (μ_θ) das vigas estudadas neste trabalho em função da taxa de armadura transversal (ρ_t), bem como os limites médios (linhas a tracejado) dos intervalos obtidos para taxas mínimas e máximas da armadura de torção, tendo por base o código EC2. O Quadro VII.7 do Anexo VII apresenta os valores limites obtidos (segundo o código EC2) para a taxa de armadura das vigas em estudo. Mais uma vez, o código em análise carece de disposições específicas relativas à limitação da armadura longitudinal.

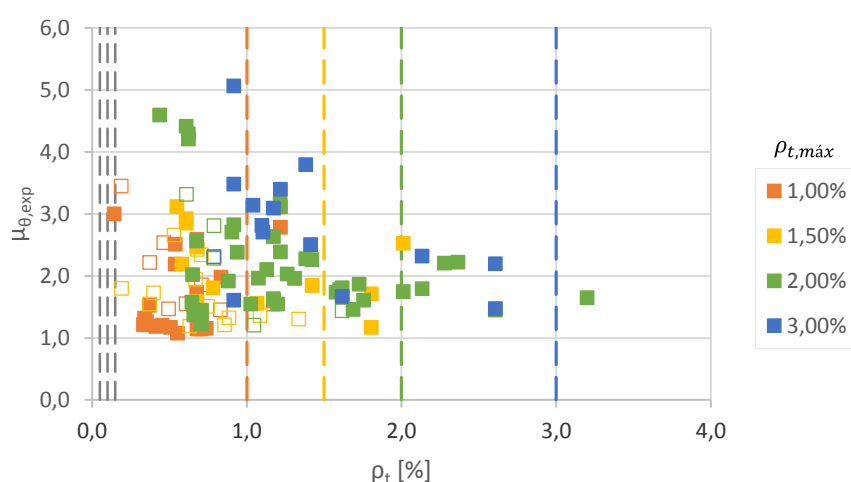


Fig.5.15 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (EC2 [11])

Na Fig.5.15, confirma-se que o código EC2 é o código que menos restringe a armadura transversal. Das poucas vigas que não cumprem o limite exigido, volta a destacar-se as vigas de secção cheia. Porém, estas vigas apresentam um índice de ductilidade superior à unidade, contrariando assim a previsão de uma rotura frágil por compressão do betão nas escoras por parte do código. Este facto justifica-se novamente com a influência da “cedência” do betão na ductilidade da viga, aspeto não considerado pelo código no cálculo da resistência das vigas à torção. Quanto às vigas de secção vazada, estas concentram-se, no geral, dentro do intervalo definido pelo código. Tal como o código prevê, estas vigas possuem um comportamento dúctil.

5.4.6 Código Canadiano, CSA A23.3-04 [14]

O Quadro 5.6, relativo à verificação das vigas de referência com base no CSA A23.3-04 mostrou que, no que toca à armadura transversal mínima exigida pelo código, este é o código que mais restringe a armadura mínima. No entanto, estas vigas mostram um comportamento dúctil ao contrário da rotura frágil por insuficiência de armadura previsto do CSA A23.3-04.

Quanto à limitação superior da armadura transversal, o Quadro 5.6 mostrou que várias vigas ultrapassavam a área máxima de armadura transversal exigida pelo código, destacando-se deste grupo as vigas de Hsu [18]. Contudo, todas as vigas que ultrapassam este limite apresentam uma rotura mais ou menos dúctil. Conclui-se assim que o CSA A23.3-04 não restringe adequadamente o limite superior da armadura transversal de torção.

As conclusões apontadas anteriormente podem ser confirmadas através da Fig.5.16 que apresenta a evolução do índice de ductilidade de torção (μ_θ) das vigas estudadas neste trabalho em função da taxa de armadura transversal (ρ_t), bem como os limites médios (linhas a tracejado) dos intervalos obtidos para taxas mínimas e máximas da armadura de torção, tendo por base o código CSA A23.3-04. O Quadro VII.8 do Anexo VII apresenta os valores limites obtidos (segundo o código CSA A23.3-04) para a taxa de armadura das vigas em estudo. Mais uma vez, o código em análise carece de disposições específicas relativas à limitação da armadura longitudinal.

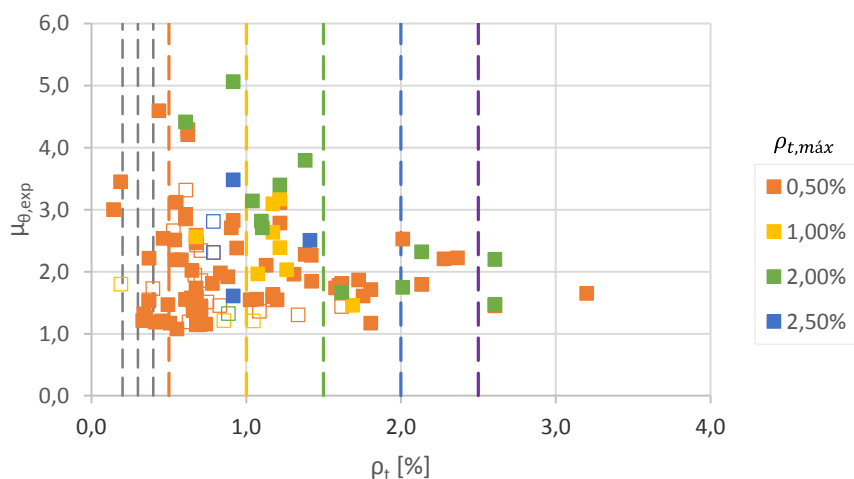


Fig.5.16 - Intervalos das taxas mínimas e máximas para a armadura transversal de torção (CSA A23.3-04 [14])

Na Fig.5.16, confirma-se que o código CSA A23.3-04 restringe muito mais a armadura mínima transversal que qualquer código analisado anteriormente. Porém é observado que as vigas que

não cumprem o limite têm um índice de ductilidade superior a 1, contrariando assim a rotura frágil por insuficiência de armadura por parte do código.

Na Fig.5.16, é notório o incumprimento do limite máximo de armadura por parte das vigas de secção cheia. Novamente destaca-se a série $\rho_{t,max} = 0,50\%$ cuja maior parte das vigas ultrapassa o limite de armadura definido pelo código, incluindo as vigas de secção vazada.

Em ambos os casos, o facto das vigas não apresentarem rotura frágil justifica-se com a influência da “cedência” do betão na ductilidade da viga, aspeto não considerado pelo código na limitação da armadura de torção.

5.5 Notas Finais

Ao longo deste capítulo foi constatado que, para uma viga, a previsão da resistência da mesma à torção assim como a previsão do tipo de comportamento último através da limitação da quantidade de armadura, varia consoante o documento normativo analisado.

No que toca à previsão da capacidade resistente das vigas à torção, o código que se encontra mais do lado da segurança é o código americano ACI 318R-11 [2]. Em contra partida, o código que se encontra menos do lado da segurança é o código canadiano CSA A23.3-04 [14]. Por outro lado, o código cuja previsão da capacidade resistente se encontra mais próxima da realidade é o código europeu EC2 [11]. No geral, são observados grandes desvios entre o valor do momento torsor resistente experimental e o correspondente valor teórico. Porém, as vigas de secção vazada com betões de alta resistência mostram ser mais precisas e coerentes nos resultados apresentados. As vigas deste género que estão inseridas no estudo deste trabalho são vigas cujos ensaios são mais recentes e, conseqüentemente, executadas com base em normas mais atualizadas e ensaios com equipamentos mais modernos.

Em relação à limitação da armadura de torção, e tal como já tinha sido referido no Capítulo 3, os códigos americanos ACI 318R-89 [1], ACI 318R-11 [2] e o código canadiano CSA A23.3-04 [14] são os únicos que apresentam disposições específicas à torção para a armadura de torção. Os dois primeiros códigos limitam inferior e superiormente a armadura transversal, assim como limitam inferiormente a armadura longitudinal. Já o código canadiano apenas limita inferior e superiormente a armadura transversal. Os restantes códigos remetem para disposições normativas relacionadas com o esforço transversal e com a flexão para a limitação da área da armadura de torção. Para a armadura transversal, o código canadiano é o código que mais restringe inferiormente a armadura, enquanto que o código europeu MC10 [10] é o

que mais restringe superiormente a armadura. Já para a armadura longitudinal, o código americano ACI 318R-89 [1] é o que mais restringe este limite. O código europeu EC2 [11] é de todos o código menos restritivo para a armadura de torção. Das vigas analisadas, verifica-se que as vigas de secção cheia são as que não cumprem a limitação superior da armadura transversal. No caso da análise das vigas pelos códigos ACI 318R-11 [2], MC10 [10] e CSA A23.3-04 [14], verificou-se que vigas com baixas taxas de armadura também não cumprem a armadura máxima permitida. Em todos os casos em que os limites não são cumpridos, os documentos normativos preveem uma rotura frágil das vigas por insuficiência de armadura ou por compressão do betão nas escoras. Contudo, em nenhuma viga tal acontece, apresentando sempre uma rotura mais ou menos dúctil (com índices de ductilidade superior à unidade). Este fenómeno justifica-se com a influência da “cedência” do betão na ductilidade da viga, discutida e demonstrada no Cap.4 deste trabalho. Este aspeto não é considerado por nenhum código na limitação da armadura de torção.

CAPÍTULO 6 - Conclusões e Recomendações para Estudos Futuros

6.1 Introdução

Neste capítulo, resumem-se as principais conclusões do presente trabalho e apresentam-se possíveis propostas de trabalhos futuros e desenvolvimento no âmbito do tema em estudo.

6.2 Conclusões

O estudo da ductilidade de vigas de betão armado sujeitas à torção pura requer informação precisa dos ensaios realizados às vigas que se pretendem estudar. No presente trabalho, apenas o autor Bernardo [7] focou os seus ensaios para o objetivo de estudar o desenvolvimento do comportamento dúctil das vigas (com secção vazada) sujeitas à torção ao longo de um historial de carga aplicada. Para as restantes vigas analisadas neste trabalho, e para colmatar a falta de informação das curvas experimentais $T - \theta$ de muitas das vigas encontradas na bibliografia, os pontos característicos das curvas foram determinados a partir do *software* TORQUE. Apesar deste aplicativo ser eficaz na previsão do comportamento de vigas à torção, os pontos característicos das curvas teóricas não representam o comportamento real da viga. Como tal, em algumas curvas experimentais, cujos pontos de cedência foram marcados através da interpolação dos pontos teóricos, estes encontram-se um pouco afastados do início do comportamento dúctil das vigas. Isto influenciou algumas das observações feitas no estudo deste trabalho.

Durante a análise das curvas $T - \theta$, foi levantada a hipótese de que o comportamento plástico do betão à compressão originado pela microfissuração (que antecede a rotura efetiva do material) pudesse ter alguma influência no início do comportamento dúctil da viga, particularmente nas vigas com taxas de armaduras moderadas ou elevadas. Assim, foram marcados pontos de “cedência” do betão em todas as curvas $T - \theta$. Os resultados mostraram ser bastante satisfatórios, principalmente para os pontos calculados a partir do diagrama tensão-extensão bilinear proposto pelo Eurocódigo 2 [11]. Estes pontos explicaram casos relacionados com vigas que mostravam um comportamento dúctil muito antes da cedência das armaduras, assim como vigas que apresentavam um comportamento dúctil sem qualquer cedência das armaduras. Em ambos os casos verificou-se uma tendência para a formação de

um patamar horizontal na curva com início muito próximo do ponto de “cedência” do betão encontrado.

No que toca à influência dos parâmetros caracterizadores das vigas, não há dúvidas de que os parâmetros que mais influenciam a ductilidade em torção de vigas em betão armado são a resistência do betão à compressão e a taxa de armadura de torção.

A resistência do betão tem um efeito favorável na ductilidade em vigas de secção cheia, ou seja, a ductilidade aumenta com a resistência à compressão do betão. Contudo o mesmo não se verifica em vigas de secção vazada. Este fenómeno poderá ser justificado pela ausência do núcleo central nas vigas de secção vazada, o qual limita a possibilidade de uma redistribuição transversal das tensões do exterior para o interior da secção, a qual permite uma rotura mais gradual da viga. O anterior aspeto é mais evidenciado em vigas de secção vazada executadas com betões de alta resistência.

Em relação à taxa de armadura incorporada nas vigas, no geral esta tem um efeito desfavorável na ductilidade. Em ambos os tipos de secções analisadas, é notória a diminuição da ductilidade com o aumento da taxa de armadura. Porém, o índice de ductilidade aparenta tender para um valor superior à unidade num amplo intervalo de para taxas de armadura, provavelmente devido à influência favorável da “cedência” do betão na ductilidade que não depende da quantidade de armadura. O valor limite da taxa de armadura a partir da qual a sua influência na ductilidade se torna menos acentuada depende da classe de resistência do betão. No presente trabalho e para vigas de secção cheia, tal valor ronda a gama dos 2,0-3,0% enquanto que para vigas de secção vazada, esta gama é inferior e ronda os 1,0-1,5%. No entanto, esta taxa limite aparenta aumentar com o aumento da resistência do betão.

Quanto às restantes variáveis de estudo analisadas neste trabalho, a sua influência na ductilidade de vigas em torção é muito reduzida ou não observável.

No geral, o desequilíbrio de armaduras não tem uma influência notável na ductilidade à torção. No entanto, neste trabalho foram observados dois casos de estudo em que a influência do desequilíbrio de armaduras foi detetada. Para vigas de secções cheias com resistências semelhantes de betão, a ductilidade mostrou ser ligeiramente maior em vigas com armaduras equilibradas. Porém, para vigas de secção cheia com fatores de escala iguais, a ductilidade apresentou um ligeiro aumento com a diminuição do parâmetro $m_{b,ef}$, ou seja, com o aumento da quantidade de armadura transversal em relação à armadura longitudinal. Dado o número reduzido de vigas em ambos os casos de estudo, estas tendências observadas não podem ser consideradas como gerais.

No estudo realizado ao longo deste trabalho, observou-se que a influência do fator de escala na ductilidade em torção não se apresentou consensual. Para uma dada gama de resistência do betão e para ambos os tipos de secção, a ductilidade aparentou aumentar com o aumento do fator de escala. Este fenómeno pode dever-se ao aumento da área da secção a qual permite uma maior possibilidade para a redistribuição transversal das tensões. Contudo, para vigas de secção cheia com taxa de armaduras semelhantes ou com equilíbrio de “volume” de armaduras semelhantes, a ductilidade diminui ligeiramente com o aumento do fator de escala. Novamente, dado o número reduzido de vigas em ambos os casos de estudo, estas tendências observadas não podem ser consideradas como gerais.

É também claro que vigas de secção cheia possuem uma ductilidade ligeiramente superior às vigas de secção vazada. Este fenómeno volta a ser justificado pela presença de núcleo central que tem um efeito favorável para a redistribuição transversal de tensões no estado último comportamental.

No estudo comparativo dos resultados obtidos neste trabalho com algumas disposições normativas de códigos internacionais, foi feita uma análise da adequação das mesmas ao comportamento último das vigas à torção.

No geral, os códigos europeus são menos limitativos do que os códigos americanos, que possuem um maior número de verificações específicas para a torção.

No que toca à limitação da armadura de torção, verificou-se que os códigos CSA A23.3-04 [14] e MC10 [10] são os que mais restringem a armadura transversal nos limites inferior e superior, respetivamente. Quanto ao limite inferior da armadura longitudinal, o código que mais restringe este limite é o código americano ACI 318R-11 [2]. De todos os códigos em análise neste trabalho, o Eurocódigo 2 [11] é o menos restritivo na armadura de torção.

Nos resultados deste trabalho, verificou-se que as vigas de secção cheia eram as que na maioria das vezes não cumpriam a limitação superior da armadura transversal. Isto deve-se provavelmente ao facto de que as vigas de secção cheia estudadas neste trabalho, foram, na sua maioria, construídas e ensaiadas há já bastantes anos, obedecendo provavelmente aos requisitos sobre torção de documentos normativos antigos ou não obedecendo de todo a quaisquer requisitos sobre torção. Com as alterações dos novos códigos para um melhor desempenho das vigas sujeitas à torção, as vigas de secção cheia “fogem” ao cumprimento das disposições regulamentares atuais. No caso da análise das vigas pelos códigos ACI 318R-11 [2], MC10 [10] e CSA A23.3-04 [14], verificou-se que vigas com baixas taxas de armadura também não cumpriam a armadura máxima permitida. Nestes dois casos, os códigos e regulamentos preveem uma rotura frágil das vigas por insuficiência de armadura ou por

compressão do betão nas escoras. Contudo, em nenhuma viga é verificada tal tipo de rotura, apresentando sempre alguma ductilidade. Esta observação vem reforçar a ideia de que a “cedência” do betão tem uma influência não desprezável na ductilidade das vigas. Este aspeto não é considerado em nenhum código para a limitação das armaduras de torção.

No estudo complementar da resistência última de vigas à torção, verificou-se que o código americano ACI 318R-11 [2] é o código que se encontra mais do lado da segurança. Por outro lado, o código que menos se encontra do lado da segurança é o CSA A23.3-04 [14]. Também se verificou que, apesar de nem sempre se encontrar do lado da segurança, o Eurocódigo 2 é o que mais se aproxima da capacidade de resistência real das vigas.

No geral, foram observados grandes desvios entre os experimentais e normativos dos momentos torsores resistentes. Contudo, as vigas de secção vazada com betões de alta resistência mostram ser mais precisas e coerentes nos resultados do que as vigas de secção cheia. Novamente este facto é provavelmente justificado pela “idade” da maioria das vigas de secção cheia que não cumprem as novas disposições normativas.

6.3 Recomendações para Estudos Futuros

No seguimento do trabalho apresentado, considera-se importante o desenvolvimento dos seguintes estudos:

- Realização de novos ensaios focadas especificamente no estudo da ductilidade e da capacidade de rotação plástica de vigas em betão armado com secção cheia e vazada sujeitas à torção;
- Estudo da influência da microfissuração do betão na ductilidade de vigas sujeitas à torção;
- Estudo comparativo entre o comportamento experimental dúctil de vigas com o comportamento previsto a partir de modelos teóricos, como o GSVATM;
- Alargamento do estudo da ductilidade a vigas sujeitas à torção com outro tipo de secções que não as retangulares (do tipo “T”, “U” e “L”);
- Estudo da ductilidade em torção de vigas pré-esforçadas e de vigas reforçadas;
- Estudo para a proposta de alterações das disposições normativas dos códigos em vigor para uma melhor garantia da ductilidade em torção de vigas de betão armado.

Bibliografia

- [1] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (ACI 318-89) and Commentary (ACI 318R-89), American Concrete Institute, Detroit, MI, 1989.
- [2] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (ACI 318-11) and Commentary (ACI 318R-11), American Concrete Institute, Detroit, MI, 2011
- [3] Ali, M.A. and White, R.N., "Toward a Rational Approach for Design of Minimum Torsion Reinforcement", *Journal of the American Concrete Institute, Proc.*, 96(1), January-February 1999, pp. 40-45.
- [4] Andrade, J.M.A, "Modelação do Comportamento Global de Vigas Sujeitas à Torção" Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.
- [5] Bernardo, L.F.A and Lopes, S.M.R, "Torsion in High-Strength Concrete Hollow Beams: Strength and Ductility Analysis", *Journal of American Concrete Institute*, No. 106-S05, February 2009.
- [6] Bernardo, L.F.A., Andrade, J.M.A. and Nunes, N.C.G., "Generalized Softened Variable Angle Truss-Model for Reinforced Concrete Beams under Torsion", *Materials and Structures* (in Press), DOI: 10.1617/s11527-014-03031-z.
- [7] Bernardo, L.F.A., "Torção em Vigas em Caixão de Betão de Alta Resistência" Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2003.
- [8] CEB, "Effort Tranchant-Torsion", *Manuel de Calcul, Bulletin d'Information N° 92*, Paris, June 1972.
- [9] CEB-FIP MODEL CODE 1990, Comité Euro-International du Béton, Suisse, 1990.
- [10] CEB-FIP MODEL CODE 2010, Comité Euro-International du Béton, Suisse, 2010.
- [11] CEN prEN 1992-1-1, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for Buildings", April 2002.
- [12] CEB, "Torsion", *Bulletin d'Information N° 71*, Mars 1969.
- [13] Chiu H-J., Fang I-K., Young W-T., Shiau J-K., "Behavior of reinforced concrete

beams with minimum torsional reinforcement", *Engineering Structures*, Taiwan, 2007, vol. 29, pp. 2193-2205.

- [14] CSA Standard, Design of concrete structures (A23.3-04), Canadian Standards Association, Mississauga, 2004.
- [15] Fang, I.K. and Shiau, J.K., "Torsional Behavior of Normal- and High-Strength Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, 101(3), 2004, pp.304-313.
- [16] Hsu, T.T.C., Inana, M and Fonticiella, L, "Behavior of Reinforced Concrete Horizontally Curved Beams" *Journal of the American Concrete Institute*, Proc., 75(4), April 1978, pp 112-123.
- [17] Hsu, T.T.C., "Torsion of Reinforced Concrete", Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
- [18] Hsu, T.T.C., "Torsion of Structural Concrete - Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members", *Torsion of Structural Concrete, SP-18*, American Concrete Institute, Detroit, 1968, pp. 261-306.
- [19] <<http://www.blogblux.com.br/2014/04/as-28-pontes-mais-espetaculares-do.html>>, acedido em setembro de 2014.
- [20] <<http://www.iam-architect.com/leon-villa>>, acedido em setembro de 2014.
- [21] <http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2013/07/15/article-2364712-0000931100000CB2-300_634x341.jpg>, acedido em setembro de 2014.
- [22] <<http://www.worldbuildingsdirectory.com/project.cfm?id=403>>, acedido em setembro de 2014.
- [23] Jeng, C.H., "Unified Softened Membrane Model for Torsion in Hollow and Solid Reinforced Concrete Members Modeling the Entire Pre- and Post- cracking Behavior," *Journal of Structural Engineering*, 2014.
- [24] Koutchoukali N-E., Belarbi A., "Torsion of High-Strength Reinforced Concrete Beams and Minimum Reinforcement Requirement", *ACI Structural Journal*, 2001, 98(4): 462-9.
- [25] Lampert, P., and Thürlimann, B., "Essais de Poutre en Béton Armé sous Torsion Simple et Flexion Combinées (Torsionsversuche und Torsions-Biege-Versuche an Stahlbetonbalken)," *Comité Européen du Béton*, B.I. n° 71, Mars, 1969, pp 177-207.
- [26] Leonhardt, Fritz, and Schelling, Günther, "Torsionsversuche na Stahlbetonbalken,"

Bulletin No. 239, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, 1974, 122 pp.

- [27] McMullen, A. E. and Rangan, B. V., "Pure Torsion in Rectangular Sections - A Re-Examination," *Journal of the American Concrete Institute*, 75(10), October 1978, pp. 511-519.
- [18] Nobre, S.S., "Modelo Modificador de Treliza Espacia com Ângulo Variável - Avaliação da Lei constitutive do Betão à Tração para Fissuração de Vigas de Betão Armado sujeitas à Torção", Dissertação de Mestrado, Departamento de Arquitetura e Engenharia Civil, Univercidade da Beira Interior, Covilhã, 2014.
- [29] Peng X-N., Wong Y-L., "Behavior of reinforced concrete walls subjected to monotonic pure torsion-An experimental study," *Engineering Structures*, China, 2011, vol. 33, pp. 2495-2508.
- [30] Priestley, M.J.N., Seible, F. and Wang, C.M., "The Northridge Earthquake of January 17, 1994 - Damage Analysis of Selected Freeway Bridges", *Report N°. SSRP - 94/06*, University of California, San Diego, February 1994.
- [31] Shin, S.W., Kamara, M. and Ghosh, S.K., "Flexural Ductility, Strength Prediction, and Hysteretic Behavior of Ultra-High-Strength Concrete Members", *SP 121-13, High-Strength Concrete, Second International Symposium*, Weston T.Hester, ACI, 1990.
- [32] Vaz, A.N.S., "Generalização do GSVATM para Vigas de Betão Armado em Caixão Sujeitas à Torção", Dissertação de Mestrado, Departamento de Arquitetura e Engenharia Civil, Univercidade da Beira Interior, Covilhã, 2014.
- [33] Walther, R et Miethbradt, M, "Dimensionnement des Structures en Béton - Bases et Technologie", *Traité de Génie Civil - Volume 7*, de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Presse Polytechnique set Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1990

Anexos

Quadro I.2 - Características das vigas de referência

		Características dos Materiais											
Viga	Tipo secção	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	E_c (GPa)	E_s (GPa)	ε_0 $\times 10^{-3}$	ε_{cu2} $\times 10^{-3}$	ε_{cu3} $\times 10^{-3}$	ε_{lu} $\times 10^{-3}$	ε_{tu} $\times 10^{-3}$
B3 [18]	Cheia	28,1	2,22	20,1	327,6	320,0	30,0	200	1,97	2,00	1,75	1,64	1,60
B4 [18]	Cheia	29,2	2,30	21,2	320,0	323,4	30,3	200	1,99	2,00	1,75	1,60	1,62
B5 [18]	Cheia	30,6	2,39	22,6	332,4	321,4	30,8	200	2,02	2,00	1,75	1,66	1,61
B6 [18]	Cheia	28,8	2,27	20,8	331,7	322,8	30,2	200	1,98	2,00	1,75	1,66	1,61
B7 [18]	Cheia	26,0	2,06	18,0	320,0	318,6	29,3	200	1,92	2,00	1,75	1,60	1,59
B8 [18]	Cheia	26,8	2,12	18,8	322,1	320,0	29,6	200	1,94	2,00	1,75	1,61	1,60
B9 [18]	Cheia	28,8	2,27	20,8	319,3	342,8	30,2	200	1,98	2,00	1,75	1,60	1,71
C4 [18]	Cheia	27,2	2,15	19,2	336,6	327,6	29,7	200	1,95	2,00	1,75	1,68	1,64
C5 [18]	Cheia	27,2	2,15	19,2	328,3	329,0	29,7	200	1,95	2,00	1,75	1,64	1,64
C6 [18]	Cheia	27,6	2,18	19,6	315,9	327,6	29,8	200	1,96	2,00	1,75	1,58	1,64
G3 [18]	Cheia	26,8	2,12	18,8	338,6	327,6	29,6	200	1,94	2,00	1,75	1,69	1,64
G4 [18]	Cheia	28,3	2,23	20,3	325,5	321,4	30,1	200	1,97	2,00	1,75	1,63	1,61
G5 [18]	Cheia	26,9	2,13	18,9	331,0	327,6	29,6	200	1,94	2,00	1,75	1,66	1,64
G7 [18]	Cheia	31,0	2,42	23,0	319,3	322,8	30,9	200	2,03	2,00	1,75	1,60	1,61
G8 [18]	Cheia	28,3	2,24	20,3	322,1	329,0	30,1	200	1,97	2,00	1,75	1,61	1,64
I3 [18]	Cheia	44,8	3,32	36,8	343,4	333,8	34,5	200	2,27	2,00	1,75	1,72	1,67
I4 [18]	Cheia	45,0	3,33	37,0	315,2	326,2	45,0	200	2,28	2,00	1,75	1,58	1,63
I5 [18]	Cheia	45,0	3,33	37,0	310,3	325,5	34,6	200	2,28	2,00	1,75	1,55	1,63
I6 [18]	Cheia	45,8	3,38	37,8	325,5	329,0	34,7	200	2,29	2,00	1,75	1,63	1,64
J1 [18]	Cheia	14,3	1,13	6,3	327,6	346,2	25,0	200	1,63	2,00	1,75	1,64	1,73
J2 [18]	Cheia	14,6	1,05	6,6	320,0	340,7	24,6	200	1,61	2,00	1,75	1,60	1,70
J3 [18]	Cheia	16,9	1,29	8,9	388,6	337,2	25,8	200	1,68	2,00	1,75	1,94	1,69
J4 [18]	Cheia	16,8	1,27	8,8	324,1	331,7	25,7	200	1,68	2,00	1,75	1,62	1,66
K2 [18]	Cheia	30,6	2,40	22,6	335,9	337,9	30,8	200	2,02	2,00	1,75	1,68	1,69
K3 [18]	Cheia	29,0	2,29	21,0	315,9	320,7	30,3	200	1,99	2,00	1,75	1,58	1,60
K4 [18]	Cheia	28,6	2,26	20,6	344,1	340,0	30,2	200	1,98	2,00	1,75	1,72	1,70
M1 [18]	Cheia	29,9	2,35	21,9	326,2	353,1	30,6	200	2,01	2,00	1,75	1,63	1,77
M2 [18]	Cheia	30,6	2,39	22,6	329,0	357,2	30,8	200	2,02	2,00	1,75	1,64	1,79
M3 [18]	Cheia	26,8	2,12	18,8	322,1	326,2	29,6	200	2,94	2,00	1,75	1,61	1,63
M4 [18]	Cheia	26,6	2,10	18,6	318,6	326,9	29,5	200	1,93	2,00	1,75	1,59	1,63
M5 [18]	Cheia	28,0	2,21	20,0	335,2	331,0	30,0	200	1,97	2,00	1,75	1,68	1,66
M6 [18]	Cheia	29,4	2,31	21,4	317,9	340,7	30,4	200	2,00	2,00	1,75	1,59	1,70
N1 [18]	Cheia	29,5	2,32	21,5	352,4	341,4	30,4	200	2,00	2,00	1,75	1,76	1,71
N1a [18]	Cheia	28,7	2,26	20,7	346,2	344,8	30,2	200	1,98	2,00	1,75	1,73	1,72
N2 [18]	Cheia	30,4	2,38	22,4	331,0	337,9	30,7	200	2,02	2,00	1,75	1,66	1,69
N2a [18]	Cheia	28,4	2,24	20,4	333,1	360,7	30,1	200	1,98	2,00	1,75	1,67	1,80
N3 [18]	Cheia	27,3	2,16	19,3	351,7	351,7	29,7	200	1,95	2,00	1,75	1,76	1,76
N4 [18]	Cheia	27,3	2,16	19,3	340,9	355,9	29,7	200	1,95	2,00	1,75	1,70	1,78

Quadro I.2 (cont.) - Características das vigas de referência

Viga	Tipo secção	Características dos Materiais											
		f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	E_c (GPa)	E_s (GPa)	ε_0 $\times 10^{-3}$	ε_{cu2} $\times 10^{-3}$	ε_{cu3} $\times 10^{-3}$	ε_{lu} $\times 10^{-3}$	ε_{tu} $\times 10^{-3}$
VB2 [26]	Cheia	26,4	2,09	18,4	541,4	541,4	29,4	200	1,93	2,00	1,75	2,71	2,71
VB3 [26]	Cheia	39,1	2,97	31,1	541,4	541,4	33,1	200	2,18	2,00	1,75	2,71	2,71
VB4 [26]	Cheia	49,8	3,61	41,8	541,4	541,4	35,6	200	2,35	2,00	1,75	2,71	2,71
VM1 [26]	Cheia	39,1	2,97	31,1	442,4	568,9	33,1	200	2,18	2,00	1,75	2,21	2,84
VM2 [26]	Cheia	36,1	2,77	28,1	431,6	436,5	32,3	200	2,13	2,00	1,75	2,16	2,18
VM3 [26]	Cheia	40,0	3,02	32,0	461,0	442,4	33,4	200	2,20	2,00	1,75	2,31	2,21
VQ1 [26]	Cheia	19,0	1,48	11,0	557,1	557,1	26,7	200	1,74	2,00	1,75	2,79	2,79
VQ3 [26]	Cheia	17,6	1,36	9,6	432,6	432,6	26,1	200	1,70	2,00	1,75	2,16	2,16
VQ9 [26]	Cheia	19,5	1,53	11,5	441,4	441,4	26,7	200	1,76	2,00	1,75	2,21	2,21
VS2-VQ2 [26]	Cheia	19,0	1,48	11,0	432,6	432,6	26,7	200	1,74	2,00	1,75	2,16	2,16
VS3 [26]	Cheia	19,5	1,53	11,5	432,6	432,6	26,7	200	1,76	2,00	1,75	2,16	2,16
VS4-VQ5 [26]	Cheia	19,0	1,48	11,0	432,6	432,6	26,7	200	1,74	2,00	1,75	2,16	2,16
VS9 [28]	Cheia	17,6	1,36	9,6	570,9	570,9	26,1	200	2,00	2,00	1,75	2,85	2,85
VS10-VB1 [28]	Cheia	19,0	1,48	11,0	570,9	570,9	26,7	200	1,74	2,00	1,75	2,85	2,85
VU1 [28]	Cheia	19,5	1,53	11,5	441,4	441,4	26,9	200	1,76	2,00	1,75	2,21	2,21
VU2 [28]	Cheia	19,5	1,53	11,5	441,4	441,4	26,9	200	1,76	2,00	1,75	2,21	2,21
VU3 [28]	Cheia	18,5	1,44	10,5	441,4	441,4	26,5	200	1,73	2,00	1,75	2,21	2,21
VU4 [28]	Cheia	18,5	1,44	10,5	441,4	441,4	26,5	200	1,73	2,00	1,75	2,21	2,21
A2 [27]	Cheia	38,2	2,91	30,2	380,0	285,0	32,9	200	2,17	2,00	1,75	1,90	1,43
A3 [27]	Cheia	39,4	2,98	31,4	352,4	360,0	33,2	200	2,19	2,00	1,75	1,76	1,80
A4 [27]	Cheia	39,2	2,97	31,2	351,0	360,0	33,1	200	2,18	2,00	1,75	1,76	1,80
B3 [27]	Cheia	38,6	2,94	30,6	352,4	360,0	33,0	200	2,17	2,00	1,75	1,76	1,80
B4 [27]	Cheia	38,5	2,93	30,5	351,0	360,0	32,9	200	2,17	2,00	1,75	1,76	1,80
B5UR1 [24]	Cheia	39,6	3,60	31,6	386,0	373,0	10,4	200	1,98	2,00	1,75	1,93	1,87
B7UR1 [24]	Cheia	64,6	4,50	56,6	386,0	399,0	38,5	200	2,55	30,07	1,84	1,93	2,00
B9UR1 [24]	Cheia	75,0	4,60	67,0	386,0	373,0	40,3	200	2,67	32,69	1,98	1,93	1,87
B12UR1 [24]	Cheia	80,6	5,30	72,6	386,0	399,0	41,1	200	2,73	34,03	2,06	1,93	2,00
B12UR2 [24]	Cheia	76,2	5,50	68,2	386,0	386,0	40,5	200	2,68	32,99	2,00	1,93	1,93
B12UR3 [2]	Cheia	72,9	5,30	64,9	379,5	386,0	39,9	200	2,65	32,18	1,95	1,90	1,93
B12UR4 [24]	Cheia	75,9	5,30	67,9	373,0	386,0	40,4	200	2,68	32,91	2,00	1,87	1,93
B12UR5 [24]	Cheia	76,7	5,50	68,7	380,0	386,0	40,5	200	2,69	33,11	2,01	1,90	1,93
B14UR1 [24]	Cheia	93,9	6,30	85,9	386,0	386,0	43,1	200	2,86	37,02	2,24	1,93	1,93
H-06-12 [15]	Cheia	78,5	4,62	70,5	410,0	440,0	40,8	200	2,71	33,54	2,03	2,05	2,20
H-07-10 [15]	Cheia	68,4	4,37	60,4	500,0	420,0	39,2	200	2,59	31,05	1,89	2,50	2,10
H-07-16 [15]	Cheia	68,4	4,37	60,4	500,0	420,0	39,2	200	2,59	31,05	1,89	2,50	2,10
H-12-12 [15]	Cheia	78,5	4,62	70,5	410,0	440,0	40,8	200	2,71	33,54	2,03	2,05	2,20
H-12-16 [15]	Cheia	78,5	4,62	70,5	520,0	440,0	40,8	200	2,71	33,54	2,03	2,60	2,20
H-14-10 [15]	Cheia	68,4	4,37	60,4	500,0	360,0	39,2	200	2,59	31,05	1,89	2,50	1,80

Quadro I.2. (cont.) - Características das vigas de referência

		Características dos Materiais											
Viga	Tipo secção	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	E_c (GPa)	E_s (GPa)	ε_0 $\times 10^{-3}$	ε_{cu2} $\times 10^{-3}$	ε_{cu3} $\times 10^{-3}$	ε_{lu} $\times 10^{-3}$	ε_{tu} $\times 10^{-3}$
H-20-20 [15]	Cheia	78,5	4,62	70,5	560,0	440,0	40,8	200	2,71	33,54	2,03	2,80	2,20
N-06-06 [15]	Cheia	35,5	2,73	27,5	440,0	440,0	32,2	200	2,12	2,00	1,75	2,20	2,20
N-06-12 [15]	Cheia	35,5	2,73	27,5	410,0	440,0	32,2	200	2,12	2,00	1,75	2,05	2,20
N-07-10 [15]	Cheia	33,5	2,60	25,5	500,0	420,0	31,6	200	2,08	2,00	1,75	2,50	2,10
N-07-16 [15]	Cheia	33,5	2,60	25,5	500,0	420,0	31,6	200	2,08	2,00	1,75	2,50	2,10
N-12-12 [15]	Cheia	35,5	2,73	27,5	410,0	440,0	32,2	200	2,12	2,00	1,75	2,05	2,20
N-12-16 [15]	Cheia	35,5	2,73	27,5	520,0	440,0	32,2	200	2,12	2,00	1,75	2,60	2,20
N-14-10 [15]	Cheia	33,5	2,60	25,5	500,0	360,0	31,6	200	2,08	2,00	1,75	2,50	1,80
N-20-20 [15]	Cheia	35,5	2,73	27,5	560,0	440,0	32,2	200	2,12	2,00	1,75	2,80	2,20
NBS-43-44 [13]	Cheia	35,0	2,70	27,0	400,0	385,0	32,0	200	2,11	2,00	1,75	2,00	1,93
NBS-82-13 [13]	Cheia	35,0	2,70	27,0	493,0	600,0	32,0	200	2,11	2,00	1,75	2,47	3,00
SW4-1 [29]	Cheia	44,2	3,28	36,2	459,0	459,0	34,9	200	2,27	2,00	1,75	2,30	2,30
D3 [18]	Vazada	28,4	2,24	20,4	341,4	333,1	30,1	200	1,98	2,00	1,75	1,71	1,67
D4 [18]	Vazada	30,6	2,40	22,6	330,3	333,1	30,8	200	2,02	2,00	1,75	1,65	1,67
T0 [25]	Vazada	45,1	3,34	37,1	345,2	357,0	34,6	200	2,28	2,00	1,75	1,73	1,78
T1 [25]	Vazada	35,3	2,72	27,3	356,7	356,7	32,1	200	2,11	2,00	1,75	1,78	1,78
T2 [25]	Vazada	35,3	2,72	27,3	357,0	357,0	32,1	200	2,11	2,00	1,75	1,78	1,78
T5 [25]	Vazada	47,1	3,45	39,1	528,6	512,9	35,0	200	2,31	2,00	1,75	2,64	2,56
VH1 [26]	Vazada	17,2	1,31	9,2	447,3	447,3	25,9	200	1,69	2,00	1,75	2,24	2,24
VH2 [26]	Vazada	17,2	1,31	9,2	447,3	447,3	25,9	200	1,69	2,00	1,75	2,24	2,24
A1 [7]	Vazada	48,4	3,53	40,4	695,9	636,7	35,3	200	2,33	2,00	1,75	3,48	3,18
A2 [7]	Vazada	47,3	3,47	39,3	672,4	695,9	35,1	200	2,31	2,00	1,75	3,36	3,48
A3 [7]	Vazada	46,2	3,40	38,2	672,4	714,8	34,8	200	2,30	2,00	1,75	3,36	3,57
A4 [7]	Vazada	54,8	3,89	46,8	723,9	714,8	36,6	200	2,42	2,00	1,75	3,62	3,57
A5 [7]	Vazada	53,1	3,80	45,1	723,9	672,4	36,3	200	2,40	2,00	1,75	3,62	3,36
B2 [7]	Vazada	69,8	4,40	61,8	672,4	695,9	39,4	200	2,61	2,31	1,91	3,36	3,48
B3 [7]	Vazada	77,8	4,61	69,8	723,9	714,8	40,7	200	2,70	2,41	2,02	3,62	3,57
B4 [7]	Vazada	79,8	4,65	71,8	723,9	672,4	41,0	200	2,72	2,44	2,05	3,62	3,36
B5 [7]	Vazada	76,4	4,57	68,4	723,9	672,4	40,5	200	2,68	2,40	2,00	3,62	3,36
C1 [7]	Vazada	91,7	4,92	83,7	695,9	636,7	42,7	200	2,80	2,55	2,21	3,48	3,18
C2 [7]	Vazada	94,8	4,98	86,8	672,4	695,9	43,2	200	2,80	2,57	2,26	3,36	3,48
C3 [7]	Vazada	91,6	4,91	83,6	723,9	714,8	42,8	200	2,80	2,55	2,21	3,62	3,57
C4 [7]	Vazada	91,4	4,91	83,4	723,9	672,4	42,7	200	2,80	2,55	2,21	3,62	3,36
C5 [7]	Vazada	96,7	5,02	88,7	723,9	672,4	43,5	200	2,80	2,59	2,28	3,62	3,36
C6 [7]	Vazada	87,5	4,83	79,5	723,9	672,4	42,2	200	2,80	2,51	2,16	3,62	3,36
A095c [23]	Vazada	35,1	2,71	27,1	371,0	381,0	32,1	200	2,11	2,00	1,75	1,86	1,91
A120a [23]	Vazada	27,6	2,18	19,6	464,0	380,0	29,8	200	1,96	2,00	1,75	2,32	1,90
B065b [23]	Vazada	39,2	2,97	31,2	452,0	380,0	33,1	200	2,18	2,00	1,75	2,26	1,90

Quadro I.2. (cont.) - Características das vigas de referência

		Características dos Materiais											
Viga	Tipo secção	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{lym} (MPa)	f_{tym} (MPa)	E_c (GPa)	E_s (GPa)	ε_0 $\times 10^{-3}$	ε_{cu2} $\times 10^{-3}$	ε_{cu3} $\times 10^{-3}$	ε_{lu} $\times 10^{-3}$	ε_{tu} $\times 10^{-3}$
B080a [23]	Vazada	46,5	3,42	38,5	454,0	392,0	34,9	200	2,30	2,00	1,75	2,27	1,96
B110a [23]	Vazada	48,1	3,51	40,1	453,0	369,0	35,2	200	2,33	2,00	1,75	2,27	1,85
C065a [23]	Vazada	78,8	5,13	70,8	338,0	376,0	40,9	200	2,71	2,42	2,04	1,69	1,88
C100a [23]	Vazada	90,6	5,69	82,6	466,0	447,0	42,6	200	2,83	2,54	2,20	2,33	2,24
D075a [23]	Vazada	94,9	5,89	86,9	469,0	381,0	43,2	200	2,87	2,58	2,26	2,35	1,91
D090a [23]	Vazada	105,7	6,36	97,7	466,0	447,0	44,6	200	2,97	2,66	2,41	2,33	2,24

Anexo I. Vigas de referência

Quadro I.1 - Características das vigas de referência

Viga	Tipo secção	Características Geométricas						Características Mecânicas					
		x (cm)	y (cm)	t (cm)	x_1 (cm)	y_1 (cm)	h/b	A_{sl} (cm ²)	A_{st}/s (cm ²)	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$
B3 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	11,36	10,16	1,17	1,17	2,35	1,02
B4 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	15,48	14,01	1,60	1,62	3,22	0,98
B5 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	20,39	18,47	2,11	2,13	4,24	1,02
B6 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	25,81	22,58	2,67	2,61	5,27	1,05
B7 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	5,16	10,16	0,53	1,17	1,71	0,46
B8 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	5,16	22,58	0,53	2,61	3,14	0,21
B9 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	11,36	4,66	1,17	0,54	1,71	2,03
C4 [18]	Cheia	25,4	25,4	-	21,6	21,6	1,00	11,36	13,11	1,76	1,76	3,52	1,03
C5 [18]	Cheia	25,4	25,4	-	21,6	21,6	1,00	15,48	17,67	2,40	2,37	4,77	1,01
C6 [18]	Cheia	25,4	25,4	-	21,6	21,6	1,00	20,39	23,91	3,16	3,20	6,36	0,95
G3 [18]	Cheia	25,4	50,8	-	21,6	47,0	2,00	11,36	8,29	0,88	0,88	1,76	1,03
G4 [18]	Cheia	25,4	50,8	-	21,6	47,0	2,00	15,48	11,29	1,20	1,20	2,40	1,01
G5 [18]	Cheia	25,4	50,8	-	21,6	47,0	2,00	20,39	15,05	1,58	1,60	3,18	1,00
G7 [18]	Cheia	25,4	50,8	-	21,6	47,0	2,00	12,00	8,84	0,93	0,94	1,87	0,98
G8 [18]	Cheia	25,4	50,8	-	21,6	47,0	2,00	17,03	12,32	1,32	1,31	2,63	0,99
I3 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	11,36	10,16	1,17	1,17	2,35	1,03
I4 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	15,48	14,01	1,60	1,62	3,22	0,96
I5 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	20,39	18,47	2,11	2,13	4,24	0,94
I6 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	25,81	22,58	2,67	2,61	5,27	1,01
J1 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	5,16	4,66	0,53	0,54	1,07	0,94
J2 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	8,00	7,21	0,83	0,83	1,66	0,93
J3 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	11,36	10,16	1,17	1,17	2,35	1,15
J4 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	15,48	14,01	1,60	1,62	3,22	0,97
K2 [18]	Cheia	15,2	49,5	-	11,4	45,7	3,25	7,74	6,77	1,03	1,03	2,05	0,99
K3 [18]	Cheia	15,2	49,5	-	11,4	45,7	3,25	12,00	10,42	1,59	1,58	3,17	0,99
K4 [18]	Cheia	15,2	49,5	-	11,4	45,7	3,25	17,03	15,05	2,26	2,28	4,54	1,00
M1 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	8,00	4,76	0,83	0,55	1,38	1,39
M2 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	11,36	6,77	1,17	0,78	1,96	1,38
M3 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	15,48	9,24	1,60	1,07	2,67	1,48
M4 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	20,39	12,33	2,11	1,42	3,53	1,44
M5 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	25,81	15,63	2,67	1,81	4,47	1,50
M6 [18]	Cheia	25,4	38,1	-	21,6	34,3	1,50	30,58	15,63	3,16	1,81	4,97	1,63
N1 [18]	Cheia	15,2	30,5	-	13,0	28,3	2,00	2,84	3,50	0,61	0,62	1,23	1,01
N1a [18]	Cheia	15,2	30,5	-	13,0	28,3	2,00	2,84	3,50	0,61	0,62	1,23	0,98
N2 [18]	Cheia	15,2	30,5	-	13,0	28,3	2,00	5,16	6,35	1,11	1,13	2,24	0,96
N2a [18]	Cheia	15,2	30,5	-	13,0	28,3	2,00	1,61	6,21	1,11	1,10	2,22	0,93

Quadro I.1 (cont.) - Características das vigas de referência

Viga	Tipo secção	Características Geométricas						Características Mecânicas					
		x (cm)	y (cm)	t (cm)	x_1 (cm)	y_1 (cm)	h/b	A_{sl} (cm ²)	A_{st}/s (cm ²)	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$
N3 [18]	Cheia	15,2	30,5	-	13,0	28,3	2,00	4,26	5,08	0,92	0,90	1,82	1,02
N4 [18]	Cheia	15,2	30,5	-	13,0	28,3	2,00	6,58	7,98	1,42	1,42	2,84	0,96
VB2 [26]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	7,01	5,84	0,66	0,71	1,37	0,94
VB3 [26]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	7,01	5,84	0,66	0,71	1,37	0,94
VB4 [26]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	7,01	5,84	0,66	0,71	1,37	0,94
VM1 [26]	Cheia	29,4	16,0	-	28,0	14,6	1,84	3,00	3,63	0,64	0,66	1,30	0,75
VM2 [26]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	6,60	5,32	0,63	0,65	1,27	0,96
VM3 [26]	Cheia	58,7	32,0	-	56,1	29,4	1,83	12,84	7,14	0,68	0,65	1,33	1,10
VQ1 [26]	Cheia	32,4	32,4	-	30,4	30,4	1,00	3,46	2,88	0,33	0,33	0,66	0,99
VQ3 [26]	Cheia	58,0	18,6	-	56,0	16,6	3,12	4,27	3,05	0,40	0,41	0,81	0,96
VQ9 [26]	Cheia	80,6	14,0	-	78,6	12,0	5,76	5,08	2,82	0,45	0,45	0,90	0,99
VS2-VQ2 [26]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	3,66	3,05	0,35	0,37	0,72	0,94
VS3 [26]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	5,49	4,55	0,52	0,55	1,07	0,94
VS4-VQ5 [26]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	7,32	6,10	0,69	0,74	1,43	0,94
VS9 [28]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	3,48	2,90	0,33	0,35	0,68	0,94
VS10-VB1 [28]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	6,96	5,80	0,66	0,70	1,36	0,94
VU1 [28]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	3,36	5,60	0,32	0,68	1,00	0,47
VU2 [28]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	5,04	5,60	0,48	0,68	1,16	0,70
VU3 [28]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	6,72	4,18	0,64	0,51	1,14	1,26
VU4 [28]	Cheia	44,0	24,0	-	42,0	22,0	1,83	6,72	2,80	0,64	0,34	0,98	1,88
A2 [27]	Cheia	25,4	25,4	-	22,2	22,2	1,00	5,16	7,82	0,80	1,08	1,88	0,99
A3 [27]	Cheia	25,4	25,4	-	21,9	21,9	1,00	8,00	8,94	1,24	1,22	2,46	1,00
A4 [27]	Cheia	25,4	25,4	-	21,9	21,9	1,00	11,36	12,42	1,76	1,69	3,45	1,02
B3 [27]	Cheia	17,8	35,6	-	14,3	32,1	2,00	8,00	8,60	1,27	1,26	2,53	0,98
B4 [27]	Cheia	17,8	35,6	-	14,3	32,1	2,00	11,36	11,76	1,80	1,73	3,52	1,02
B5UR1 [24]	Cheia	20,3	30,5	-	16,5	26,7	1,50	5,16	6,56	0,83	0,92	1,75	0,94
B7UR1 [24]	Cheia	20,3	30,5	-	16,5	26,7	1,50	5,16	6,56	0,83	0,92	1,75	0,88
B9UR1 [24]	Cheia	20,3	30,5	-	16,5	26,7	1,50	5,16	6,56	0,83	0,92	1,75	0,94
B12UR1 [24]	Cheia	20,3	30,5	-	16,5	26,7	1,50	5,16	6,56	0,83	0,92	1,75	0,88
B12UR2 [24]	Cheia	20,3	30,5	-	16,5	26,7	1,50	5,16	6,95	0,83	0,97	1,80	0,86
B12UR3 [2]	Cheia	20,3	30,5	-	16,5	26,7	1,50	6,58	7,46	1,06	1,04	2,10	1,00
B12UR4 [24]	Cheia	20,3	30,5	-	16,5	26,7	1,50	7,74	7,88	1,25	1,10	2,35	1,10
B12UR5 [24]	Cheia	20,3	30,5	-	16,5	26,7	1,50	8,00	10,13	1,29	1,41	2,71	0,90
B14UR1 [24]	Cheia	20,3	30,5	-	16,5	26,7	1,50	5,16	6,56	0,83	0,92	1,75	0,91
H-06-12 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	20,65	7,10	1,18	0,61	1,79	1,81
H-07-10 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	17,03	7,89	0,97	0,68	1,65	1,71
H-07-16 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	28,39	7,89	1,62	0,68	2,30	2,86
H-12-12 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	20,65	14,19	1,18	1,22	2,40	0,90

Quadro I.1 (cont.) - Características das vigas de referência

Viga	Tipo secção	Características Geométricas						Características Mecânicas					
		x (cm)	y (cm)	t (cm)	x_1 (cm)	y_1 (cm)	h/b	A_{sl} (cm ²)	A_{st}/s (cm ²)	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$
H-12-16 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	28,39	14,19	1,62	1,22	2,84	1,58
H-14-10 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	17,03	16,13	0,97	1,38	2,36	0,98
H-20-20 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	34,06	23,46	1,95	2,01	3,96	1,23
N-06-06 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	12,00	7,10	0,69	0,61	1,29	1,13
N-06-12 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	20,65	7,10	1,18	0,61	1,79	1,81
N-07-10 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	17,03	7,89	0,97	0,68	1,65	1,71
N-07-16 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	28,39	7,89	1,62	0,68	2,30	2,86
N-12-12 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	20,65	14,19	1,18	1,22	2,40	0,90
N-12-16 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	28,39	14,19	1,62	1,22	2,84	1,58
N-14-10 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	17,03	16,13	0,97	1,38	2,36	0,98
N-20-20 [15]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	34,06	23,46	1,95	2,01	3,96	1,23
NBS-43-44 [13]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	7,60	5,09	0,43	0,44	0,87	1,03
NBS-82-13 [13]	Cheia	35,0	50,0	-	30,0	45,0	1,43	14,25	1,67	0,81	0,14	0,96	4,68
SW4-1 [29]	Cheia	15,0	45,0	-	10,0	40,0	3,00	7,85	3,93	1,16	0,58	1,75	2,00
D3 [18]	Vazada	25,4	38,1	6,4	21,6	34,3	1,50	11,36	10,16	1,17	1,17	2,35	1,02
D4 [18]	Vazada	25,4	38,1	6,4	21,6	34,3	1,50	15,48	14,01	1,60	1,62	3,22	0,98
T0 [25]	Vazada	50,0	50,0	8,0	43,0	43,0	1,00	32,16	10,28	1,29	0,71	1,99	1,76
T1 [25]	Vazada	50,0	50,0	8,0	45,4	45,4	1,00	18,10	10,28	0,72	0,75	1,47	0,97
T2 [25]	Vazada	50,0	50,0	8,0	43,0	43,0	1,00	18,10	10,28	0,72	0,71	1,43	1,02
T5 [25]	Vazada	80,0	40,0	8,0	73,0	33,0	2,00	10,00	10,28	0,31	0,68	0,99	0,47
VH1 [26]	Vazada	32,4	32,4	8,0	30,4	30,4	1,00	3,46	2,88	0,33	0,33	0,66	0,99
VH2 [26]	Vazada	32,4	32,4	8,0	30,4	30,4	1,00	6,91	5,76	0,66	0,67	1,33	0,99
A1 [7]	Vazada	60,0	60,0	9,8	53,7	54,7	1,00	6,53	3,14	0,18	0,19	0,37	1,05
A2 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,7	53,8	53,1	1,00	13,95	6,28	0,39	0,37	0,76	1,00
A3 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,9	53,5	53,5	1,00	18,10	8,27	0,50	0,49	1,00	0,96
A4 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,4	52,0	52,5	1,00	23,75	11,22	0,66	0,65	1,31	1,03
A5 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,4	52,8	52,8	1,00	30,66	14,14	0,85	0,83	1,68	1,11
B2 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,8	53,3	53,4	1,00	14,58	6,70	0,41	0,40	0,80	0,99
B3 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,9	53,5	53,7	1,00	23,75	11,22	0,66	0,67	1,33	1,00
B4 [7]	Vazada	60,0	60,0	11,2	52,3	53,6	1,00	32,17	15,08	0,89	0,89	1,78	1,09
B5 [7]	Vazada	60,0	60,0	11,7	51,8	51,8	1,00	40,21	18,85	1,12	1,09	2,20	1,11
C1 [7]	Vazada	60,0	60,0	9,7	54,0	54,9	1,00	6,53	3,14	0,18	0,19	0,37	1,04
C2 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,0	53,2	53,3	1,00	13,95	6,28	0,39	0,37	0,76	1,01
C3 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,3	54,5	54,0	1,00	23,75	10,47	0,66	0,63	1,29	1,06
C4 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,3	54,6	54,5	1,00	30,66	14,14	0,85	0,86	1,71	1,07
C5 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,4	54,0	54,3	1,00	36,69	17,40	1,02	1,05	2,07	1,05
C6 [7]	Vazada	60,0	60,0	10,4	53,3	52,9	1,00	48,25	22,62	1,34	1,34	2,68	1,08
A095c [23]	Vazada	49,7	71,1	14,5	43,7	65,1	1,43	13,16	9,93	0,37	0,61	0,98	0,59

Quadro I.1 (cont.) - Características das vigas de referência

Viga	Tipo secção	Características Geométricas						Características Mecânicas					
		x (cm)	y (cm)	t (cm)	x_1 (cm)	y_1 (cm)	h/b	A_{sl} (cm ²)	A_{st}/s (cm ²)	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{tot} (%)	$m_{b,ef}$
A120a [23]	Vazada	50,2	71,9	18,4	44,2	65,9	1,43	20,00	7,59	0,55	0,46	1,02	1,46
B065b [23]	Vazada	50,3	71,0	9,2	44,3	65,0	1,41	50,97	9,93	1,43	0,61	2,04	2,79
B080a [23]	Vazada	50,0	72,1	11,2	44,0	66,1	1,44	28,39	12,90	0,79	0,79	1,58	1,16
B110a [23]	Vazada	49,8	71,0	15,5	43,8	65,0	1,43	20,00	8,60	0,57	0,53	1,10	1,31
C065a [23]	Vazada	49,5	78,1	8,5	43,5	72,1	1,58	20,00	9,93	0,52	0,59	1,11	0,78
C100a [23]	Vazada	49,9	72,3	12,7	43,9	66,3	1,45	28,39	12,90	0,79	0,79	1,58	1,04
D075a [23]	Vazada	49,8	73,4	8,7	43,8	67,4	1,47	28,39	12,90	0,78	0,79	1,56	1,22
D090a [23]	Vazada	50,1	72,2	10,5	44,1	66,2	1,44	28,39	12,90	0,79	0,79	1,57	1,04

Anexo II. Pontos Característicos da Curva T- θ

Quadro II.1 - Curva T- θ Experimental

Viga	Tipo secção	T_{cr}^{exp} (kNm)	θ_{cr}^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_{cy}^{exp} (kNm)	θ_{cy}^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_{ly}^{exp} (kNm)	θ_{ly}^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_{ty}^{exp} (kNm)	θ_{ty}^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_r^{exp} (kNm)	θ_r^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_u^{exp} (kNm)	θ_u^{exp} ($^{\circ}$ /m)
B3 [18]	Cheia	20,1	0,12	36,3	2,37	37,3	2,81	36,7	2,49	37,5	2,95	35,1	3,86
B4 [18]	Cheia	21,9	0,12	46,2	2,56	-	-	-	-	47,3	3,27	44,2	4,63
B5 [18]	Cheia	22,6	0,14	54,8	2,85	-	-	-	-	56,1	3,54	55,9	5,10
B6 [18]	Cheia	25,0	0,16	59,7	3,05	-	-	-	-	61,6	3,74	61,7	4,41
B7 [18]	Cheia	20,2	0,11	26,7	2,45	25,8	1,72	-	-	26,9	2,76	25,0	4,52
B8 [18]	Cheia	21,8	0,13	32,3	2,55	32,0	2,71	-	-	32,5	2,44	30,4	3,75
B9 [18]	Cheia	19,6	0,11	29,1	2,69	-	-	26,9	1,73	29,8	2,91	27,0	4,34
C4 [18]	Cheia	11,9	0,14	24,6	3,68	-	-	-	-	25,3	4,45	21,4	5,91
C5 [18]	Cheia	14,0	0,17	29,3	3,98	-	-	-	-	29,7	4,84	23,8	8,83
C6 [18]	Cheia	13,9	0,17	33,7	4,43	-	-	-	-	34,2	5,24	30,4	7,30
G3 [18]	Cheia	27,1	0,10	46,6	2,40	45,8	2,21	44,8	2,03	49,6	2,91	48,4	3,89
G4 [18]	Cheia	28,7	0,12	62,7	2,47	64,1	2,90	63,2	2,62	64,8	3,07	58,2	3,82
G5 [18]	Cheia	29,5	0,11	65,1	2,53	-	-	-	-	71,9	3,11	63,1	4,49
G7 [18]	Cheia	33,6	0,14	50,7	2,21	48,0	1,67	48,1	1,68	52,6	2,56	48,2	3,96
G8 [18]	Cheia	33,6	0,12	69,9	2,26	-	-	73,3	2,85	73,4	2,83	62,6	4,42
I3 [18]	Cheia	25,5	0,11	43,8	2,16	40,9	1,69	40,3	1,62	45,6	2,72	36,7	5,01
I4 [18]	Cheia	28,0	0,12	45,5	1,71	43,1	1,61	44,8	1,68	58,0	2,28	55,9	2,68
I5 [18]	Cheia	28,1	0,15	66,6	2,24	70,7	3,10	70,4	3,18	70,7	3,07	63,2	5,20
I6 [18]	Cheia	27,5	0,13	71,9	2,35	-	-	-	-	76,7	3,15	70,9	5,16
J1 [18]	Cheia	14,0	0,09	20,7	2,38	20,8	2,43	21,4	2,77	21,5	2,64	18,6	5,20
J2 [18]	Cheia	17,1	0,12	28,4	2,62	-	-	-	-	29,1	2,95	25,9	5,20
J3 [18]	Cheia	16,9	0,10	34,7	2,90	-	-	-	-	35,2	3,15	28,2	4,64
J4 [18]	Cheia	18,0	0,11	39,8	3,15	-	-	-	-	40,6	3,35	38,9	5,21
K2 [18]	Cheia	12,2	0,18	21,0	2,51	20,5	2,30	20,7	2,39	23,7	3,15	22,9	3,55
K3 [18]	Cheia	12,4	0,19	27,7	3,39	-	-	-	-	28,5	4,33	22,8	5,88
K4 [18]	Cheia	13,1	0,21	33,8	3,92	-	-	-	-	35,0	4,92	28,8	8,66
M1 [18]	Cheia	19,2	0,11	29,5	2,27	27,4	1,76	25,6	1,38	30,4	2,52	26,1	5,49
M2 [18]	Cheia	20,6	0,11	39,1	2,48	40,1	3,03	37,5	2,05	40,5	2,95	37,5	3,71
M3 [18]	Cheia	20,7	0,12	41,2	2,63	-	-	42,6	3,00	43,8	3,07	43,0	4,08
M4 [18]	Cheia	20,7	0,13	47,3	2,84	-	-	-	-	49,6	3,31	45,2	5,22
M5 [18]	Cheia	21,7	0,12	53,5	3,09	-	-	-	-	55,7	3,58	53,0	5,29
M6 [18]	Cheia	22,7	0,15	59,7	2,75	-	-	-	-	60,1	3,21	60,1	3,21
N1 [18]	Cheia	7,6	0,13	8,8	4,15	8,1	2,53	8,1	2,48	9,1	4,33	8,2	10,64
N1a [18]	Cheia	7,0	0,11	8,7	4,12	8,0	2,53	8,0	2,58	9,0	4,33	8,2	10,63
N2 [18]	Cheia	7,4	0,22	13,6	3,89	13,6	3,89	13,6	4,02	14,5	4,92	12,4	8,18
N2a [18]	Cheia	7,5	0,21	12,6	3,84	12,9	4,30	13,1	4,90	13,2	4,84	10,6	10,40
N3 [18]	Cheia	7,4	0,21	11,1	3,74	11,1	3,76	11,0	3,60	12,2	4,69	9,8	9,75

Quadro II.1 (cont.) - Curva T- θ Experimental

Viga	Tipo secção	T_{cr}^{exp} (kNm)	θ_{cr}^{exp} (°/m)	T_{cy}^{exp} (kNm)	θ_{cy}^{exp} (°/m)	T_{ly}^{exp} (kNm)	θ_{ly}^{exp} (°/m)	T_{ty}^{exp} (kNm)	θ_{ty}^{exp} (°/m)	T_r^{exp} (kNm)	θ_r^{exp} (°/m)	T_u^{exp} (kNm)	θ_u^{exp} (°/m)
N4 [18]	Cheia	7,6	0,21	15,0	4,12	-	-	-	-	15,7	5,12	12,9	9,33
VB2 [26]	Cheia	19,9	0,09	39,7	3,42	-	-	-	-	42,1	4,21	42,2	4,18
VB3 [26]	Cheia	23,5	0,12	41,0	3,20	43,2	3,70	43,4	3,75	46,4	4,41	46,4	4,50
VB4 [26]	Cheia	32,0	0,25	46,3	3,04	45,7	2,93	46,2	3,03	48,5	4,29	48,6	4,24
VM1 [26]	Cheia	7,2	0,21	13,6	4,63	13,3	4,05	11,9	3,00	13,9	5,63	13,9	5,55
VM2 [26]	Cheia	23,9	0,25	37,5	2,87	35,2	2,18	35,6	2,24	39,2	3,66	39,2	3,43
VM3 [26]	Cheia	50,9	0,22	95,0	1,82	89,0	1,53	84,3	1,34	100,8	2,40	100,9	3,66
VQ1 [26]	Cheia	14,2	0,12	20,7	2,68	-	-	21,0	3,10	21,1	3,27	21,1	3,24
VQ3 [26]	Cheia	12,1	0,09	19,3	2,58	19,2	2,52	19,2	2,52	20,0	2,99	19,9	2,98
VQ9 [26]	Cheia	10,0	0,25	21,1	3,82	21,2	3,97	21,2	3,93	21,9	4,65	21,9	4,59
VS2-VQ2 [26]	Cheia	12,2	0,21	18,3	2,23	16,9	1,77	17,0	1,81	19,5	2,68	19,5	2,70
VS3 [26]	Cheia	16,2	0,15	28,4	3,70	-	-	28,6	4,53	28,6	4,41	28,6	3,97
VS4-VQ5 [26]	Cheia	14,0	0,12	33,4	3,46	-	-	-	-	34,3	4,06	34,4	3,99
VS9 [28]	Cheia	12,0	0,19	20,7	2,97	-	-	-	-	21,6	3,62	21,6	3,74
VS10-VB1 [28]	Cheia	14,1	0,09	31,7	3,37	-	-	-	-	33,3	3,94	33,3	3,86
VU1 [28]	Cheia	16,6	0,18	22,9	2,51	22,9	2,54	-	-	23,9	2,95	23,1	3,99
VU2 [28]	Cheia	16,6	0,12	30,2	3,51	-	-	-	-	30,4	4,09	30,4	4,01
VU3 [28]	Cheia	15,1	0,21	29,6	3,54	-	-	-	-	31,0	4,13	31,0	4,13
VU4 [28]	Cheia	16,5	0,20	24,5	2,81	-	-	23,9	2,57	26,0	3,23	25,9	3,40
A2 [27]	Cheia	11,3	0,12	21,7	3,49	19,7	2,48	18,6	2,12	22,6	3,98	22,3	4,17
A3 [27]	Cheia	12,2	0,12	26,1	2,45	25,7	2,36	25,8	2,38	27,8	3,23	24,4	7,49
A4 [27]	Cheia	12,5	0,15	30,9	2,98	-	-	-	-	34,4	3,98	32,6	4,34
B3 [27]	Cheia	8,8	0,15	24,7	3,61	24,7	3,64	24,8	3,76	25,3	4,73	20,7	7,32
B4 [27]	Cheia	10,2	0,15	29,9	3,50	-	-	-	-	31,7	4,53	26,6	6,54
B5UR1 [24]	Cheia	11,6	0,09	14,0	1,75	12,7	1,33	12,8	1,43	19,4	2,18	15,5	3,75
B7UR1 [24]	Cheia	14,1	0,80	15,4	1,02	14,1	0,58	14,1	0,70	18,9	1,93	15,1	2,94
B9UR1 [24]	Cheia	13,0	0,13	19,2	1,87	15,2	0,90	15,4	0,98	21,1	2,05	16,9	3,01
B12UR1 [24]	Cheia	16,2	0,09	19,3	1,11	17,7	0,52	17,9	0,62	19,4	1,14	15,5	1,80
B12UR2 [24]	Cheia	17,8	0,11	18,3	0,64	18,0	0,31	18,1	0,38	18,4	0,75	14,7	2,07
B12UR3 [2]	Cheia	16,0	0,10	21,7	1,78	18,1	1,05	18,9	1,18	22,5	2,02	18,0	3,31
B12UR4 [24]	Cheia	16,9	0,14	22,2	1,69	19,4	1,10	19,3	1,09	23,7	1,93	19,0	3,06
B12UR5 [24]	Cheia	13,6	0,04	22,6	2,17	19,9	1,54	21,0	1,78	24,0	2,50	19,2	3,85
B14UR1 [24]	Cheia	19,3	0,12	17,3	0,11	3,9	0,04	5,1	0,05	21,0	0,21	16,8	2,99
H-06-12 [15]	Cheia	75,0	0,09	114,1	1,30	111,2	1,11	96,3	0,68	115,1	1,46	94,1	4,90
H-07-10 [15]	Cheia	70,5	0,09	113,4	1,53	122,6	1,90	95,1	0,91	126,7	1,90	101,4	3,93
H-07-16 [15]	Cheia	65,3	0,09	143,3	1,93	-	-	121,6	1,29	144,5	2,15	115,6	3,18
H-12-12 [15]	Cheia	77,1	0,07	146,9	1,81	132,4	1,30	140,9	1,53	155,3	2,17	124,2	4,43
H-12-16 [15]	Cheia	79,3	0,09	189,2	1,83	-	-	183,9	1,68	196,0	2,25	156,8	3,99
H-14-10 [15]	Cheia	61,8	0,09	118,1	1,71	115,1	1,62	101,7	1,29	135,2	2,18	108,2	4,90

Quadro II.1 (cont.) - Curva T-θ Experimental

Viga	Tipo secção	T_{cr}^{exp} (kNm)	θ_{cr}^{exp} (°/m)	T_{cy}^{exp} (kNm)	θ_{cy}^{exp} (°/m)	T_{ly}^{exp} (kNm)	θ_{ly}^{exp} (°/m)	T_{ty}^{exp} (kNm)	θ_{ty}^{exp} (°/m)	T_r^{exp} (kNm)	θ_r^{exp} (°/m)	T_u^{exp} (kNm)	θ_u^{exp} (°/m)
H-20-20 [15]	Cheia	76,0	0,09	223,7	2,13	-	-	-	-	239,0	2,66	191,2	3,72
N-06-06 [15]	Cheia	43,2	0,08	75,4	2,62	72,7	2,32	70,2	2,09	79,7	3,24	63,8	5,95
N-06-12 [15]	Cheia	51,8	0,12	92,8	1,91	-	-	89,0	1,67	95,2	2,32	76,2	4,88
N-07-10 [15]	Cheia	41,6	0,11	104,8	2,33	-	-	100,5	2,07	111,7	2,91	94,6	5,36
N-07-16 [15]	Cheia	40,0	0,11	114,1	2,76	-	-	115,2	2,83	117,3	3,16	94,9	4,79
N-12-12 [15]	Cheia	49,3	0,09	111,1	2,09	-	-	-	-	116,8	2,74	93,4	6,51
N-12-16 [15]	Cheia	57,1	0,12	129,2	1,83	-	-	-	-	138,0	2,30	110,4	5,08
N-14-10 [15]	Cheia	41,8	0,12	117,9	2,61	-	-	-	-	125,0	3,37	101,1	5,95
N-20-20 [15]	Cheia	55,0	0,13	135,8	1,31	-	-	-	-	158,0	1,75	126,4	3,62
NBS-43-44 [13]	Cheia	44,5	0,33	60,5	1,91	52,1	0,92	52,0	0,91	60,6	2,25	48,5	4,17
NBS-82-13 [13]	Cheia	46,2	0,00	52,9	0,59	-	-	50,3	0,36	52,9	0,59	42,3	1,08
SW4-1 [29]	Cheia	13,2	0,21	17,3	3,51	-	-	17,2	3,01	17,3	4,33	13,8	6,60
D3 [18]	Vazada	15,2	0,08	36,2	2,22	-	-	38,7	3,06	39,1	2,80	35,5	3,44
D4 [18]	Vazada	15,8	0,12	44,7	2,27	-	-	-	-	47,9	2,97	46,5	3,27
T0 [25]	Vazada	49,8	0,06	167,3	1,09	185,5	1,46	127,3	0,70	185,5	1,30	185,5	1,30
T1 [25]	Vazada	48,0	0,04	139,8	2,29	129,4	1,53	130,0	1,56	140,0	2,32	140,0	2,32
T2 [25]	Vazada	52,8	0,10	142,9	2,55	136,1	1,71	136,7	1,74	143,1	2,50	141,0	4,00
T5 [25]	Vazada	62,5	0,06	152,2	1,86	127,4	1,10	156,9	2,73	156,9	2,30	156,9	4,50
VH1 [26]	Vazada	12,0	0,12	20,4	2,40	20,8	2,53	20,3	2,36	21,8	2,87	21,8	2,86
VH2 [26]	Vazada	11,5	0,07	33,3	3,22	-	-	-	-	34,5	3,67	34,5	3,67
A1 [7]	Vazada	104,1	0,07	144,6	1,62	131,8	1,02	128,4	0,78	150,8	2,12	120,6	2,69
A2 [7]	Vazada	109,5	0,06	248,2	1,86	247,1	1,83	239,4	1,69	254,1	2,02	203,3	3,74
A3 [7]	Vazada	113,3	0,06	278,0	1,66	259,2	1,46	272,7	1,58	299,9	2,10	241,7	2,14
A4 [7]	Vazada	120,9	0,06	322,9	1,58	368,2	2,30	360,9	2,16	368,2	2,30	294,6	2,42
A5 [7]	Vazada	120,9	0,04	345,5	1,52	-	-	-	-	412,2	2,15	329,8	2,20
B2 [7]	Vazada	116,7	0,04	270,1	1,74	273,3	1,79	265,8	1,68	273,3	1,79	218,6	2,89
B3 [7]	Vazada	130,5	0,05	319,2	1,42	295,2	1,88	-	-	355,8	1,78	284,7	1,98
B4 [7]	Vazada	142,9	0,07	372,1	1,25	-	-	-	-	437,9	1,61	350,3	1,66
B5 [7]	Vazada	146,3	0,06	388,2	1,15	-	-	-	-	456,2	1,53	365,0	1,56
C1 [7]	Vazada	117,3	0,04	149,9	1,14	-	-	150,0	1,13	151,8	1,76	121,4	2,03
C2 [7]	Vazada	124,5	0,05	258,2	1,66	246,5	1,44	244,8	1,41	266,1	1,88	212,9	2,18
C3 [7]	Vazada	131,9	0,06	323,8	1,37	-	-	347,7	1,57	351,2	1,64	280,9	1,63
C4 [7]	Vazada	132,6	0,05	413,0	1,47	-	-	-	-	450,3	1,69	360,2	1,77
C5 [7]	Vazada	138,3	0,05	430,4	1,35	-	-	-	-	467,3	1,59	373,8	1,63
C6 [7]	Vazada	139,1	0,05	454,5	1,13	-	-	-	-	521,3	1,46	417,1	1,47
A095c [23]	Vazada	102,9	0,03	208,6	1,42	160,2	0,69	184,7	0,95	210,0	1,71	199,0	3,15
A120a [23]	Vazada	89,8	0,05	209,8	1,83	209,2	2,53	189,5	1,22	215,3	2,10	172,2	3,09
B065b [23]	Vazada	54,4	0,03	247,1	1,05	-	-	188,9	0,75	278,0	1,20	222,4	1,16
B080a [23]	Vazada	65,2	0,03	297,6	1,66	296,3	1,62	262,8	1,18	300,7	1,76	240,5	2,72

Quadro II.1 (cont.) - Curva T- θ Experimental

Viga	Tipo secção	T_{cr}^{exp} (kNm)	θ_{cr}^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_{cy}^{exp} (kNm)	θ_{cy}^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_{ly}^{exp} (kNm)	θ_{ly}^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_{ty}^{exp} (kNm)	θ_{ty}^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_r^{exp} (kNm)	θ_r^{exp} ($^{\circ}$ /m)	T_u^{exp} (kNm)	θ_u^{exp} ($^{\circ}$ /m)
B110a [23]	Vazada	128,3	0,04	237,0	1,71	219,0	1,08	181,8	0,73	237,5	1,72	200,0	2,86
C065a [23]	Vazada	91,7	0,03	156,9	0,49	109,8	0,13	116,7	0,17	182,0	0,63	145,6	0,86
C100a [23]	Vazada	122,2	0,03	367,3	1,83	307,6	1,04	293,4	0,96	370,2	1,93	296,1	2,23
D075a [23]	Vazada	90,1	0,03	334,5	1,75	284,4	1,01	232,7	0,73	339,5	1,82	271,6	2,31
D090a [23]	Vazada	96,1	0,03	332,2	1,86	219,5	0,79	204,9	0,73	343,1	1,73	311,0	2,06

Quadro II.2 - Curva T-θ Teórica

Viga	Tipo secção	T_{cr}^{teo} (kNm)	θ_{cr}^{teo} (°/m)	T_{cy}^{teo} (kNm)	θ_{cy}^{teo} (°/m)	T_{ly}^{teo} (kNm)	θ_{ly}^{teo} (°/m)	T_{ty}^{teo} (kNm)	θ_{ty}^{teo} (°/m)	T_r^{teo} (kNm)	θ_r^{teo} (°/m)	T_u^{teo} (kNm)	θ_u^{teo} (°/m)
B3 [18]	Cheia	20,3	0,13	43,2	2,14	44,2	2,54	43,6	2,25	44,3	2,69	35,5	3,60
B4 [18]	Cheia	21,7	0,14	50,1	1,91	-	-	-	-	51,9	2,48	41,5	3,37
B5 [18]	Cheia	23,6	0,15	56,3	1,76	-	-	-	-	58,9	2,25	47,1	3,22
B6 [18]	Cheia	24,8	0,16	56,7	1,63	-	-	-	-	58,9	2,07	47,2	2,99
B7 [18]	Cheia	19,3	0,12	31,0	2,23	29,0	1,56	-	-	31,2	2,54	25,0	3,57
B8 [18]	Cheia	22,4	0,16	32,1	1,75	32,0	1,87	-	-	32,1	1,75	25,7	2,99
B9 [18]	Cheia	18,9	0,14	31,2	2,45	-	-	28,9	1,58	31,3	2,69	26,4	3,94
C4 [18]	Cheia	12,0	0,17	27,8	2,12	-	-	-	-	28,8	2,66	23,1	3,74
C5 [18]	Cheia	13,0	0,18	30,1	1,95	-	-	-	-	31,3	2,47	25,1	3,52
C6 [18]	Cheia	15,0	0,21	32,1	1,81	-	-	-	-	33,3	2,28	26,7	3,35
G3 [18]	Cheia	28,2	0,12	53,8	2,19	53,2	2,01	52,2	1,85	54,4	2,68	47,1	3,50
G4 [18]	Cheia	30,0	0,12	64,1	1,95	65,6	2,29	64,8	2,07	65,7	2,45	52,7	3,31
G5 [18]	Cheia	31,0	0,13	69,9	1,70	-	-	-	-	72,3	2,14	57,9	2,99
G7 [18]	Cheia	30,3	0,12	57,6	2,34	55,1	1,77	55,2	1,78	57,9	2,69	53,6	3,83
G8 [18]	Cheia	30,4	0,12	67,0	1,87	-	-	69,1	2,37	69,1	2,37	55,4	3,23
I3 [18]	Cheia	25,0	0,12	51,3	2,65	49,3	2,07	48,7	1,98	51,7	3,32	47,8	4,71
I4 [18]	Cheia	26,0	0,13	60,7	2,26	59,9	2,12	60,5	2,22	62,3	2,97	50,0	4,18
I5 [18]	Cheia	27,3	0,13	68,7	1,99	72,2	2,75	72,1	2,81	72,2	2,72	57,9	3,84
I6 [18]	Cheia	28,7	0,14	75,1	1,83	-	-	-	-	79,8	2,49	63,9	3,64
J1 [18]	Cheia	13,7	0,13	22,3	2,21	22,4	2,26	22,5	2,58	22,5	2,50	18,1	3,12
J2 [18]	Cheia	14,5	0,13	26,8	1,88	-	-	-	-	27,1	2,16	21,7	2,82
J3 [18]	Cheia	17,1	0,15	33,7	1,67	-	-	-	-	34,2	1,91	27,4	2,68
J4 [18]	Cheia	17,8	0,16	35,2	1,61	-	-	-	-	35,7	1,82	28,6	2,61
K2 [18]	Cheia	12,0	0,16	24,7	3,19	24,3	2,91	24,5	3,04	25,2	3,92	20,2	5,41
K3 [18]	Cheia	12,2	0,16	28,8	2,61	-	-	-	-	29,8	3,34	23,9	4,69
K4 [18]	Cheia	12,6	0,17	31,6	2,32	-	-	-	-	32,9	2,95	26,3	4,28
M1 [18]	Cheia	19,4	0,13	30,8	2,84	30,2	2,21	28,5	1,73	30,9	3,15	28,8	4,46
M2 [18]	Cheia	20,3	0,13	39,2	2,35	39,6	2,87	37,7	1,95	39,6	2,82	31,7	3,89
M3 [18]	Cheia	19,9	0,13	41,6	1,95	-	-	42,3	2,23	42,3	2,32	33,9	3,32
M4 [18]	Cheia	21,0	0,14	45,6	1,77	-	-	-	-	46,7	2,12	37,4	3,08
M5 [18]	Cheia	22,9	0,15	50,2	1,67	-	-	-	-	51,4	2,03	41,2	2,99
M6 [18]	Cheia	24,0	0,16	51,9	1,64	-	-	-	-	53,0	2,00	42,4	2,99
N1 [18]	Cheia	6,2	0,19	9,5	4,77	9,0	2,91	9,0	2,85	9,5	5,02	9,1	7,53
N1a [18]	Cheia	6,1	0,19	9,4	4,67	8,9	2,87	9,0	2,92	9,4	4,98	9,0	7,33
N2 [18]	Cheia	6,6	0,20	13,9	3,41	13,9	3,41	14,0	3,52	14,3	4,32	11,4	5,80
N2a [18]	Cheia	6,4	0,20	13,5	3,29	13,8	3,69	13,9	4,21	13,9	4,17	11,1	5,58
N3 [18]	Cheia	6,2	0,19	12,2	3,56	12,2	3,57	12,1	3,43	12,4	4,45	10,0	5,81
N4 [18]	Cheia	6,6	0,21	14,7	2,94	-	-	-	-	15,2	3,71	12,1	5,13
VB2 [26]	Cheia	20,6	0,11	40,0	2,37	-	-	-	-	41,8	2,97	33,4	3,85

Quadro II.2 (cont.) - Curva T-θ Teórica

Viga	Tipo secção	T_{cr}^{teo} (kNm)	θ_{cr}^{teo} (°/m)	T_{cy}^{teo} (kNm)	θ_{cy}^{teo} (°/m)	T_{ly}^{teo} (kNm)	θ_{ly}^{teo} (°/m)	T_{ty}^{teo} (kNm)	θ_{ty}^{teo} (°/m)	T_r^{teo} (kNm)	θ_r^{teo} (°/m)	T_u^{teo} (kNm)	θ_u^{teo} (°/m)
VB3 [26]	Cheia	24,8	0,12	48,0	2,77	49,2	3,21	49,3	3,25	49,6	3,83	42,6	4,71
VB4 [26]	Cheia	27,9	0,12	50,5	3,04	50,2	2,93	50,5	3,02	52,2	4,16	48,4	5,29
VM1 [26]	Cheia	6,1	0,25	9,5	5,19	9,4	4,55	8,8	3,36	9,6	6,32	9,1	8,38
VM2 [26]	Cheia	23,7	0,12	40,2	3,05	38,4	2,31	38,7	2,38	40,6	3,74	38,6	5,03
VM3 [26]	Cheia	57,7	0,10	102,1	2,32	99,6	1,95	96,2	1,71	103,4	2,88	97,7	3,91
VQ1 [26]	Cheia	16,3	0,14	25,6	2,69	-	-	26,3	3,11	26,4	3,29	24,2	3,78
VQ3 [26]	Cheia	14,4	0,16	22,4	2,97	22,3	2,89	22,3	2,89	22,6	3,49	20,0	4,23
VQ9 [26]	Cheia	13,8	0,15	21,8	3,56	21,9	3,71	21,9	3,67	22,1	4,25	18,2	5,31
VS2-VQ2 [26]	Cheia	15,9	0,14	23,2	2,93	22,4	2,33	22,6	2,39	23,3	3,39	22,5	4,12
VS3 [26]	Cheia	17,5	0,13	29,6	2,42	-	-	30,3	2,96	30,3	2,91	24,3	3,59
VS4-VQ5 [26]	Cheia	17,7	0,13	33,2	2,11	-	-	-	-	33,9	2,53	27,1	3,28
VS9 [28]	Cheia	15,3	0,14	24,2	2,66	-	-	-	-	24,8	3,22	20,9	3,77
VS10-VB1 [28]	Cheia	17,6	0,13	33,0	2,12	-	-	-	-	34,1	2,55	27,3	3,29
VU1 [28]	Cheia	17,3	0,15	25,6	2,28	25,7	2,31	-	-	25,9	2,67	20,8	3,42
VU2 [28]	Cheia	17,8	0,12	29,8	2,24	-	-	-	-	30,3	2,66	24,3	3,40
VU3 [28]	Cheia	16,9	0,13	29,0	2,25	-	-	-	-	29,6	2,62	23,7	3,39
VU4 [28]	Cheia	15,7	0,15	24,4	2,35	-	-	24,0	2,15	24,6	2,68	19,7	3,47
A2 [27]	Cheia	12,8	0,15	23,2	3,47	22,3	2,47	21,4	2,11	23,2	3,98	22,0	5,87
A3 [27]	Cheia	13,3	0,15	29,5	2,84	29,3	2,75	29,3	2,76	30,3	3,76	24,5	4,99
A4 [27]	Cheia	13,8	0,15	34,4	2,42	-	-	-	-	36,1	3,25	28,9	4,50
B3 [27]	Cheia	11,9	0,17	26,8	3,01	26,9	3,04	27,1	3,14	27,7	3,99	22,4	5,40
B4 [27]	Cheia	12,5	0,18	30,9	2,59	-	-	-	-	32,5	3,42	26,1	4,89
B5UR1 [24]	Cheia	11,8	0,14	22,6	3,50	21,4	2,65	21,9	2,85	22,8	4,32	21,4	5,97
B7UR1 [24]	Cheia	14,9	0,14	24,8	4,25	22,7	2,42	23,8	2,91	24,8	4,84	23,5	7,49
B9UR1 [24]	Cheia	16,1	0,14	24,5	4,96	22,8	2,38	23,3	2,61	24,5	5,22	23,4	8,42
B12UR1 [24]	Cheia	16,6	0,14	25,4	5,04	23,1	2,35	24,3	2,83	25,4	4,90	24,2	8,39
B12UR2 [24]	Cheia	16,2	0,15	25,5	4,75	23,2	2,33	24,5	2,81	25,5	4,88	24,2	8,03
B12UR3 [2]	Cheia	16,0	0,14	28,9	4,26	26,7	2,52	27,4	2,74	28,9	4,73	27,1	7,40
B12UR4 [24]	Cheia	16,3	0,14	30,8	4,11	29,2	2,68	29,1	2,64	30,8	4,49	28,4	7,12
B12UR5 [24]	Cheia	16,7	0,15	34,7	3,73	32,7	2,64	33,8	3,06	34,9	4,39	31,1	6,53
B14UR1 [24]	Cheia	17,8	0,14	25,4	5,79	23,2	2,29	24,2	2,65	25,4	5,15	24,3	9,13
H-06-12 [15]	Cheia	69,6	0,11	114,9	2,65	114,0	2,26	103,3	1,39	115,1	2,90	102,1	4,44
H-07-10 [15]	Cheia	66,9	0,11	114,2	2,42	115,0	2,99	102,7	1,44	115,0	2,96	101,6	4,19
H-07-16 [15]	Cheia	68,2	0,11	118,7	2,00	-	-	110,1	1,34	119,0	2,25	95,3	3,67
H-12-12 [15]	Cheia	79,6	0,09	159,3	2,33	149,9	1,68	155,9	1,98	160,4	2,78	145,0	4,01
H-12-16 [15]	Cheia	80,0	0,09	171,1	1,99	-	-	168,1	1,82	173,9	2,44	139,3	3,62
H-14-10 [15]	Cheia	75,0	0,09	151,9	2,19	150,8	2,07	143,3	1,65	154,1	2,77	140,5	3,91
H-20-20 [15]	Cheia	83,7	0,09	208,6	1,77	-	-	-	-	216,0	2,23	172,9	3,32
N-06-06 [15]	Cheia	51,2	0,09	90,5	2,18	88,8	1,93	86,6	1,74	91,8	2,73	86,1	3,56

Quadro II.2 (cont.) - Curva T-θ Teórica

Viga	Tipo secção	T_{cr}^{teo} (kNm)	θ_{cr}^{teo} (°/m)	T_{cy}^{teo} (kNm)	θ_{cy}^{teo} (°/m)	T_{ly}^{teo} (kNm)	θ_{ly}^{teo} (°/m)	T_{ty}^{teo} (kNm)	θ_{ty}^{teo} (°/m)	T_r^{teo} (kNm)	θ_r^{teo} (°/m)	T_u^{teo} (kNm)	θ_u^{teo} (°/m)
N-06-12 [15]	Cheia	51,3	0,10	96,9	1,82	-	-	93,9	1,58	98,4	2,19	78,8	3,08
N-07-10 [15]	Cheia	52,0	0,10	97,7	1,83	-	-	94,8	1,63	99,8	2,30	79,9	3,10
N-07-16 [15]	Cheia	52,3	0,10	97,5	1,58	-	-	97,9	1,63	98,8	1,85	79,1	2,77
N-12-12 [15]	Cheia	55,2	0,09	125,4	1,62	-	-	-	-	131,3	2,14	105,1	2,88
N-12-16 [15]	Cheia	55,8	0,10	125,3	1,49	-	-	-	-	130,2	1,87	104,4	2,67
N-14-10 [15]	Cheia	55,6	0,09	123,5	1,60	-	-	-	-	130,1	2,08	104,3	2,84
N-20-20 [15]	Cheia	59,8	0,10	144,9	1,36	-	-	-	-	152,6	1,80	122,2	2,51
NBS-43-44 [13]	Cheia	46,9	0,11	61,5	3,06	58,2	1,47	58,0	1,45	61,5	3,19	60,4	4,86
NBS-82-13 [13]	Cheia	38,5	0,16	48,5	2,29	-	-	44,5	1,40	48,5	2,42	42,5	3,68
SW4-1 [29]	Cheia	11,6	0,20	21,9	3,57	-	-	21,1	3,07	22,3	4,39	17,9	6,43
D3 [18]	Vazada	7,9	0,05	39,7	2,02	-	-	41,1	2,78	41,5	2,52	33,2	3,57
D4 [18]	Vazada	8,7	0,06	45,2	1,91	-	-	-	-	47,8	2,46	38,3	3,38
T0 [25]	Vazada	38,1	0,03	170,3	1,60	170,8	2,13	151,9	1,03	171,8	1,84	144,5	2,89
T1 [25]	Vazada	33,0	0,03	140,0	1,82	136,1	1,22	136,7	1,24	140,0	1,84	130,1	3,13
T2 [25]	Vazada	33,0	0,03	140,2	1,82	136,3	1,22	136,9	1,24	140,2	1,74	130,3	3,14
T5 [25]	Vazada	86,3	0,07	185,1	1,97	159,2	1,17	185,4	2,89	187,7	2,44	171,1	3,19
VH1 [26]	Vazada	9,7	0,07	20,1	2,50	20,2	2,64	20,0	2,46	20,4	2,93	19,0	3,48
VH2 [26]	Vazada	10,2	0,08	27,1	1,88	-	-	-	-	27,8	2,18	22,2	2,91
A1 [7]	Vazada	87,7	0,07	133,4	3,74	128,7	1,54	126,4	1,44	133,9	4,80	132,8	5,30
A2 [7]	Vazada	112,0	0,05	258,5	2,02	254,0	1,68	256,6	1,79	258,7	2,18	246,6	3,33
A3 [7]	Vazada	128,4	0,04	313,4	1,66	321,8	1,85	324,4	2,08	324,4	2,09	282,5	2,79
A4 [7]	Vazada	75,2	0,02	339,6	1,54	-	-	-	-	370,0	2,20	325,1	2,79
A5 [7]	Vazada	74,7	0,02	368,3	1,38	-	-	-	-	402,3	1,94	322,4	2,44
B2 [7]	Vazada	131,8	0,03	274,1	2,35	265,6	1,61	270,6	1,77	274,1	2,39	261,3	3,93
B3 [7]	Vazada	134,1	0,03	413,8	1,76	-	-	426,3	2,13	426,6	2,20	351,9	3,10
B4 [7]	Vazada	99,0	0,03	458,0	1,67	-	-	-	-	478,7	2,07	382,5	2,79
B5 [7]	Vazada	97,8	0,02	494,7	1,48	-	-	-	-	524,3	1,91	413,6	2,57
C1 [7]	Vazada	88,8	0,06	134,4	4,52	122,5	1,51	120,5	1,43	136,9	6,90	136,3	7,28
C2 [7]	Vazada	126,5	0,03	259,7	2,82	245,0	1,58	249,7	1,70	259,9	3,14	251,4	4,69
C3 [7]	Vazada	129,7	0,03	403,5	1,91	-	-	405,5	1,98	408,5	2,24	358,9	3,32
C4 [7]	Vazada	102,1	0,03	472,0	1,88	-	-	473,2	1,90	478,1	2,13	397,0	2,96
C5 [7]	Vazada	106,4	0,03	537,7	1,79	-	-	-	-	550,7	2,06	440,6	2,82
C6 [7]	Vazada	103,4	0,03	574,4	1,51	-	-	-	-	600,0	1,90	480,1	2,57
A095c [23]	Vazada	101,6	0,04	187,3	1,83	165,8	0,89	181,9	1,23	187,5	2,21	180,0	2,92
A120a [23]	Vazada	86,8	0,04	184,4	1,46	182,4	2,02	166,8	0,98	185,6	1,67	163,5	2,35
B065b [23]	Vazada	58,0	0,02	241,3	1,24	-	-	223,5	0,88	242,8	1,40	194,9	2,19
B080a [23]	Vazada	70,3	0,02	295,6	1,53	295,6	1,49	277,3	1,09	295,9	1,61	266,1	2,76
B110a [23]	Vazada	128,5	0,04	214,4	2,05	209,6	1,34	187,0	0,91	214,4	2,06	204,7	3,48
C065a [23]	Vazada	106,3	0,03	226,7	2,84	195,3	0,76	212,2	1,00	227,8	3,53	223,1	4,63

Quadro II.2 (cont.) - Curva T- θ Teórica

Viga	Tipo secção	T_{cr}^{teo} (kNm)	θ_{cr}^{teo} (°/m)	T_{cy}^{teo} (kNm)	θ_{cy}^{teo} (°/m)	T_{ly}^{teo} (kNm)	θ_{ly}^{teo} (°/m)	T_{ty}^{teo} (kNm)	θ_{ty}^{teo} (°/m)	T_r^{teo} (kNm)	θ_r^{teo} (°/m)	T_u^{teo} (kNm)	θ_u^{teo} (°/m)
C100a [23]	Vazada	134,3	0,03	338,7	2,21	319,4	1,26	312,2	1,16	338,8	2,32	318,4	3,79
D075a [23]	Vazada	103,9	0,03	319,1	2,29	307,1	1,32	279,5	0,96	319,1	2,36	300,2	3,85
D090a [23]	Vazada	110,3	0,03	346,5	2,81	337,9	1,19	331,3	1,11	346,6	2,60	329,0	3,96

Anexo III. Análise das Curvas T- θ

Vigas de Secção Cheia

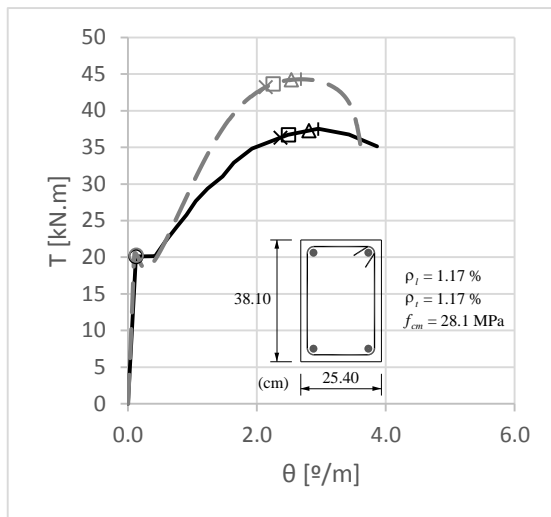


Fig. III.1 - Curvas T- θ da viga B3 (Hsu [18])

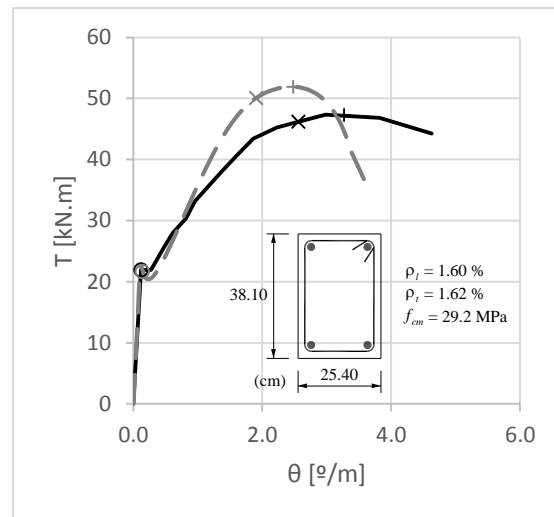


Fig. III.2 - Curvas T- θ da viga B4 (Hsu [18])

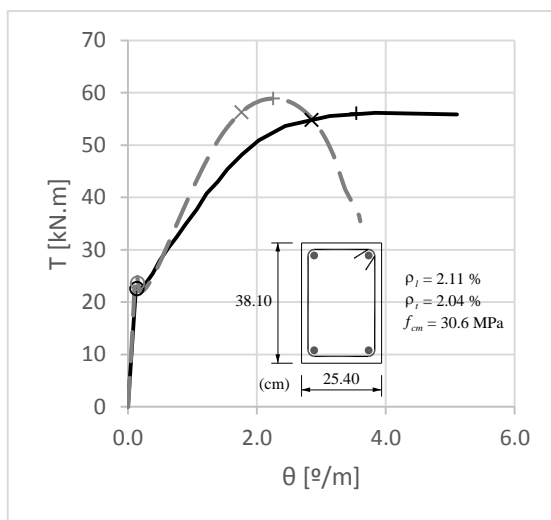


Fig. III.3 - Curvas T- θ da viga B5 (Hsu [18])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

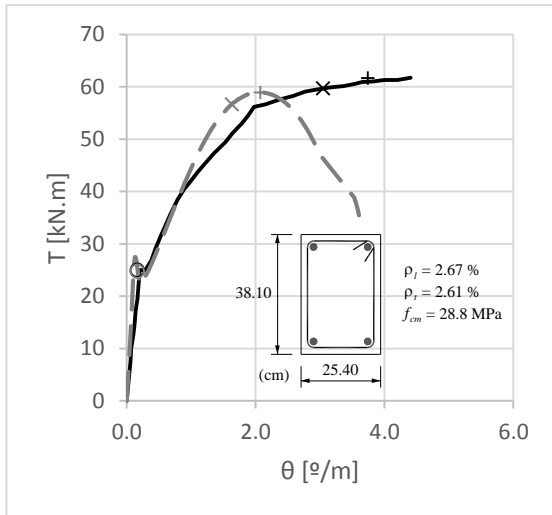


Fig. III.4 - Curvas T - θ da viga B6 (Hsu [18])

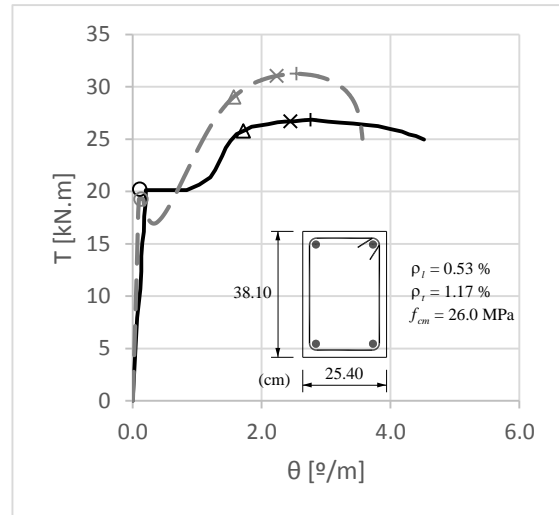


Fig. III.5 - Curvas T - θ da viga B7 (Hsu [18])

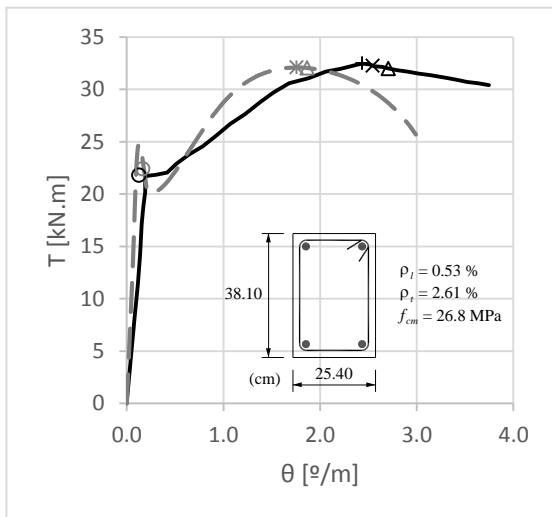


Fig. III.6 - Curvas T - θ da viga B8 (Hsu [18])

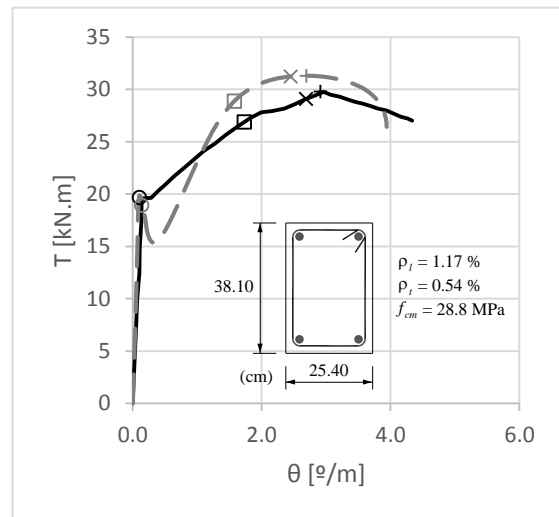


Fig. III.7 - Curvas T - θ da viga B9 (Hsu [18])

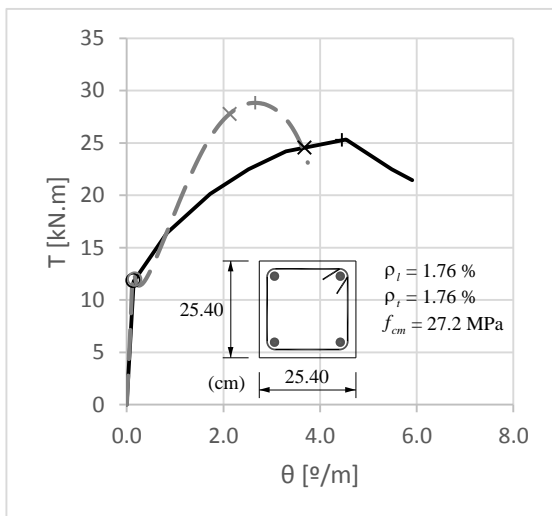


Fig. III.8 - Curvas T - θ da viga C4 (Hsu [18])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

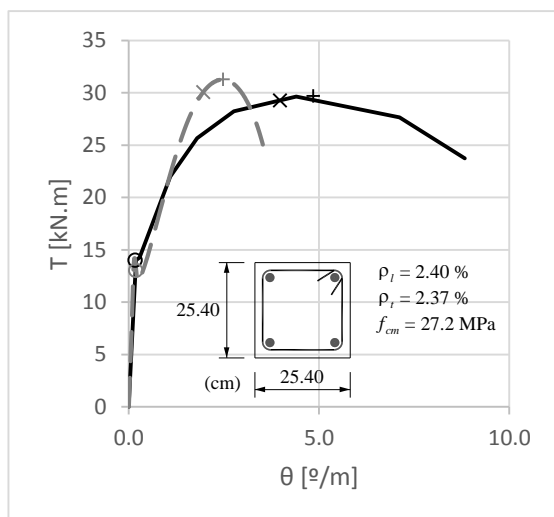


Fig. III.9 - Curvas T - θ da viga C5 (Hsu [18])

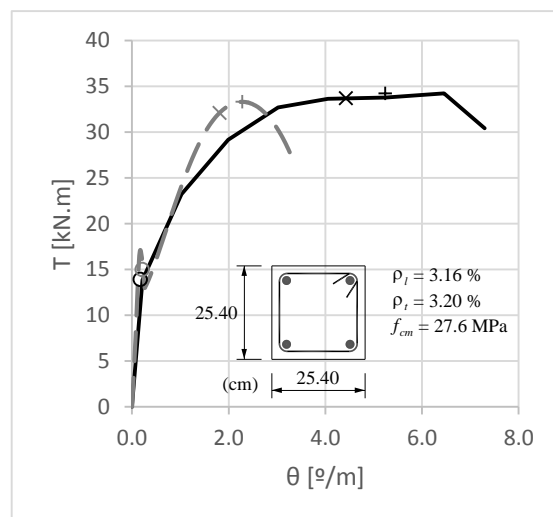


Fig. III.10 - Curvas T - θ da viga C6 (Hsu [18])

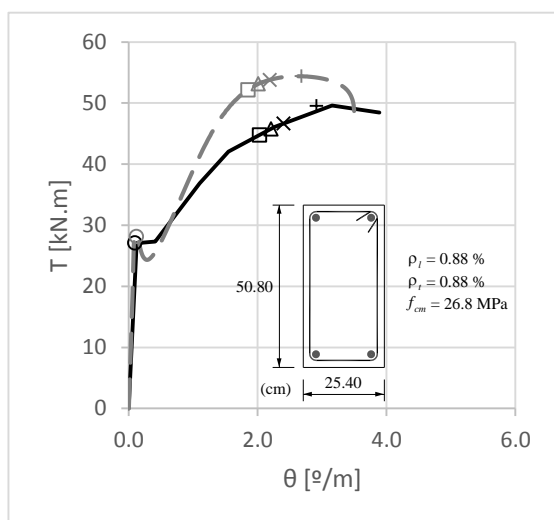


Fig. III.11 - Curvas T - θ da viga G3 (Hsu [18])

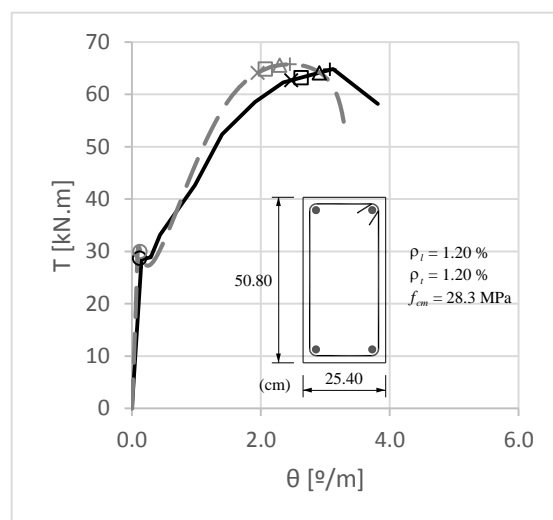


Fig. III.12 - Curvas T - θ da viga G4 (Hsu [18])

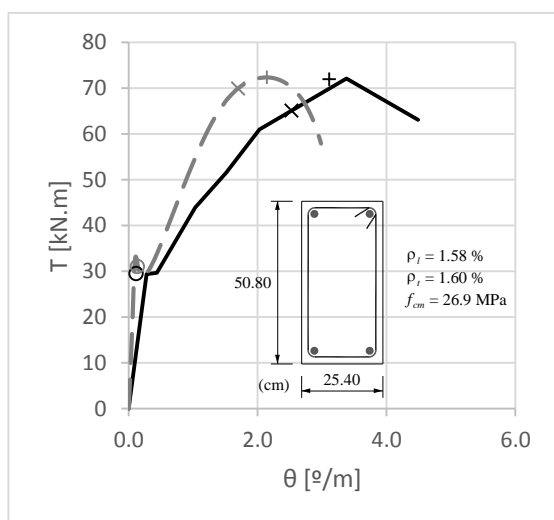


Fig. III.13 - Curvas T - θ da viga G5 (Hsu [18])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

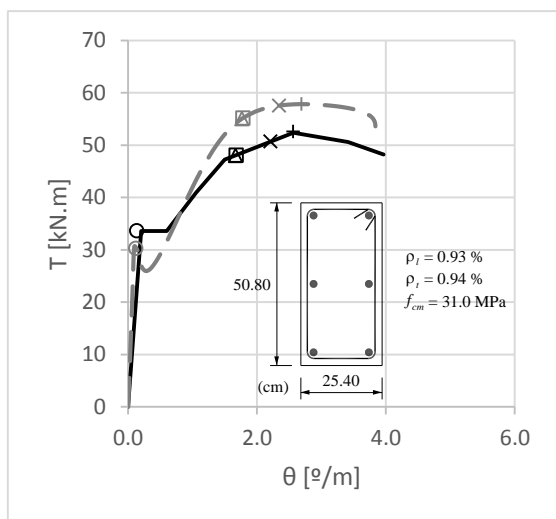


Fig. III.14 - Curvas T - θ da viga G7 (Hsu [18])

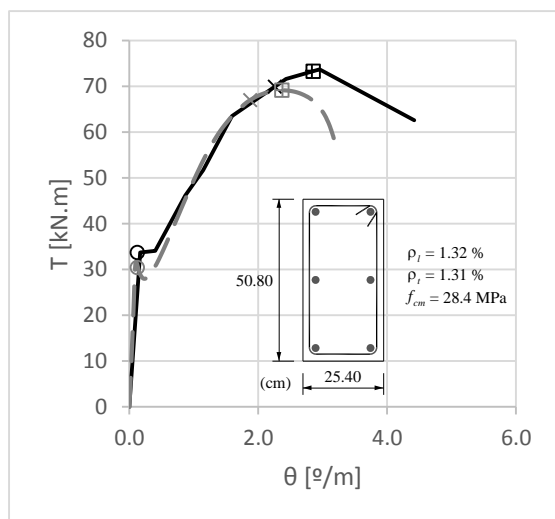


Fig. III.15 - Curvas T - θ da viga G8 (Hsu [18])

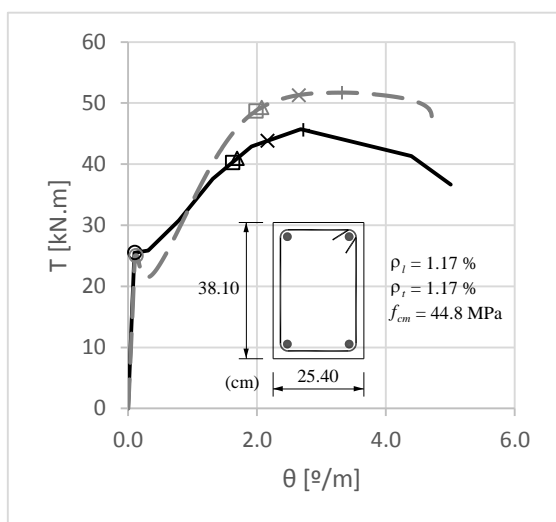


Fig. III.16 - Curvas T - θ da viga I3 (Hsu [18])

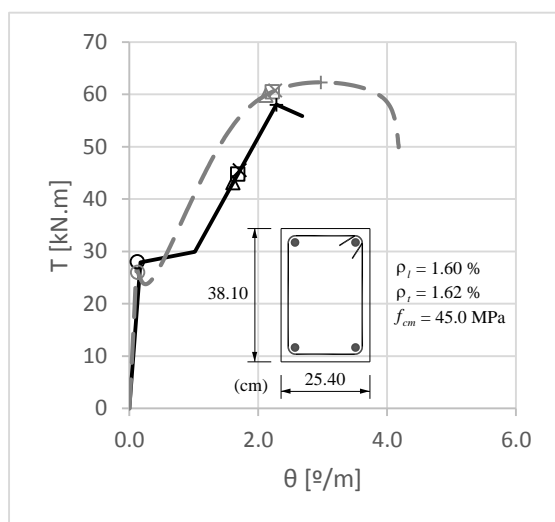


Fig. III.17 - Curvas T - θ da viga I4 (Hsu [18])

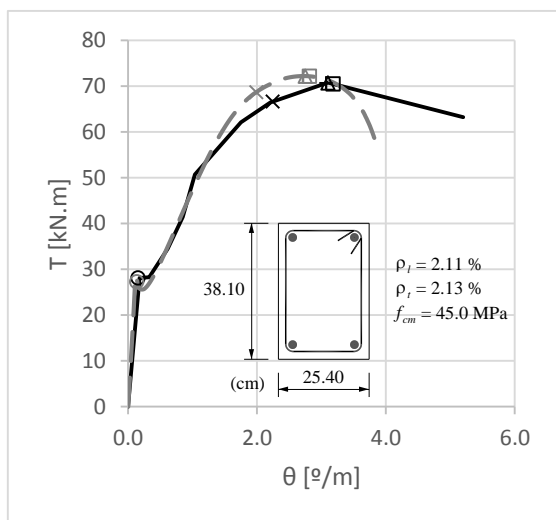


Fig. III.18 - Curvas T - θ da viga I5 (Hsu [18])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

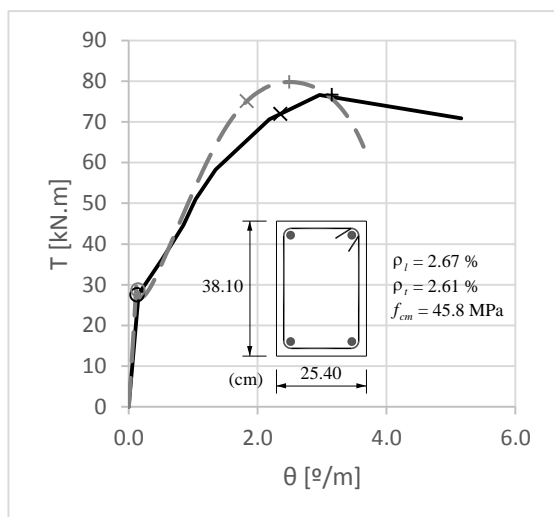


Fig. III.19 - Curvas T - θ da viga I6 (Hsu [18])

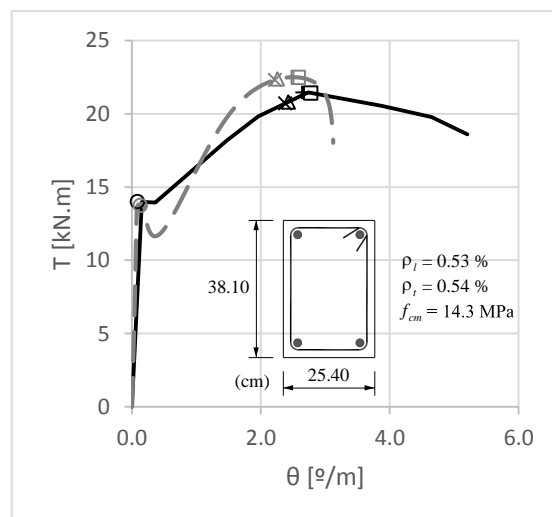


Fig. III.20 - Curvas T - θ da viga J1 (Hsu [18])

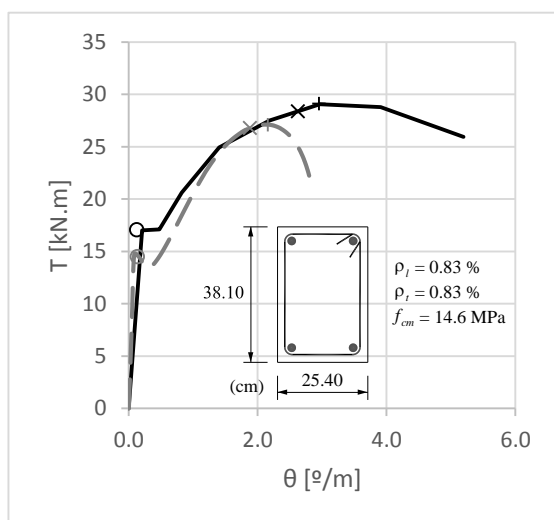


Fig. III.21 - Curvas T - θ da viga J2 (Hsu [18])

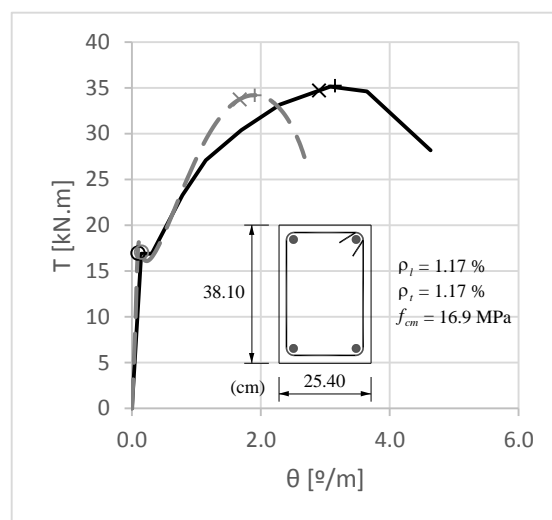


Fig. III.22 - Curvas T - θ da viga J3 (Hsu [18])

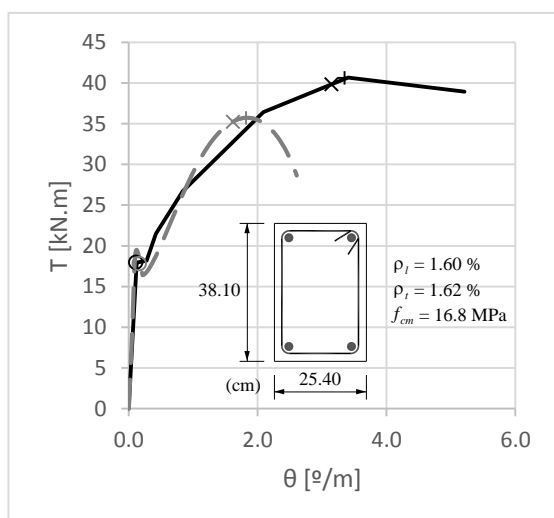


Fig. III.23 - Curvas T - θ da viga J4 (Hsu [18])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

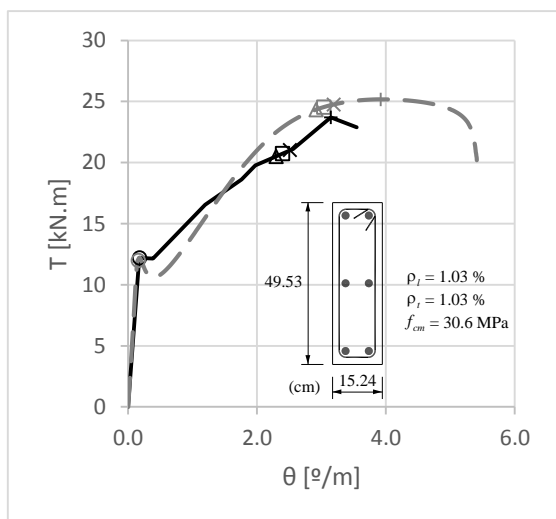


Fig. III.24 - Curvas $T-\theta$ da viga K2 (Hsu [18])

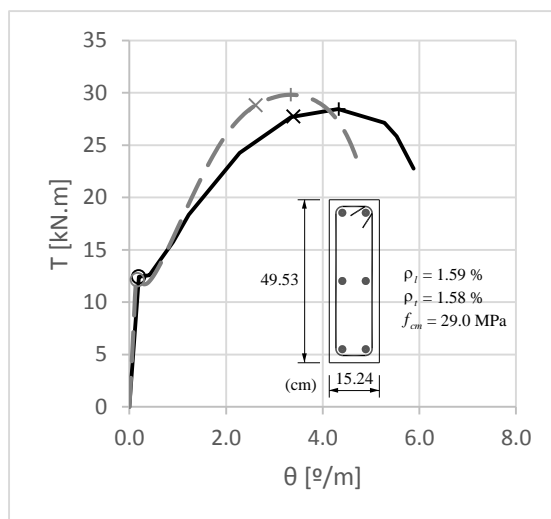


Fig. III.25 - Curvas $T-\theta$ da viga K3 (Hsu [18])

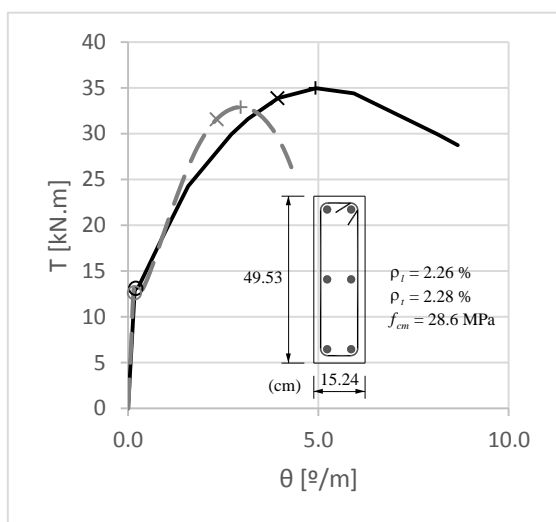


Fig. III.26 - Curvas $T-\theta$ da viga K4 (Hsu [18])

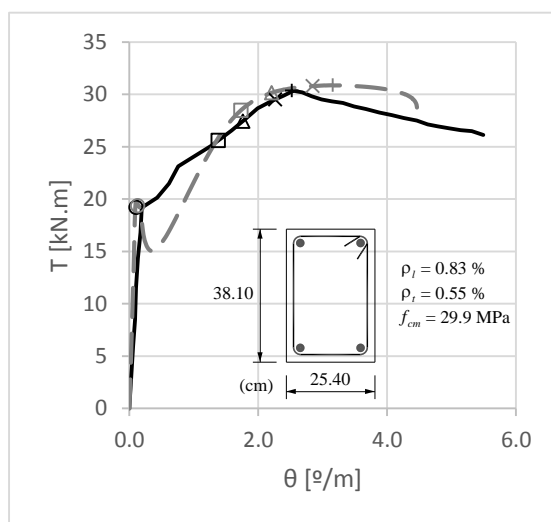


Fig. III.27 - Curvas $T-\theta$ da viga M1 (Hsu [18])

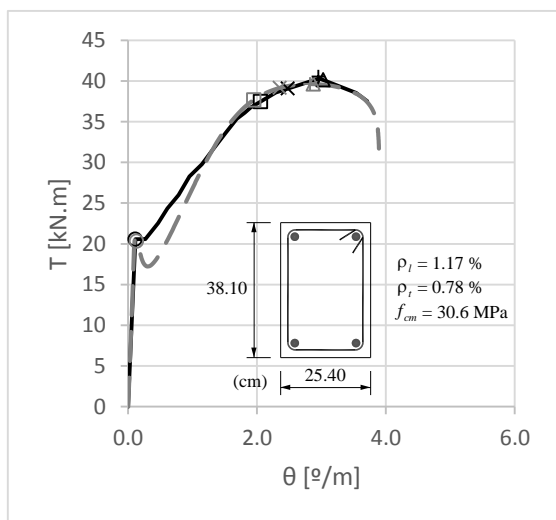


Fig. III.28 - Curvas $T-\theta$ da viga M2 (Hsu [18])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

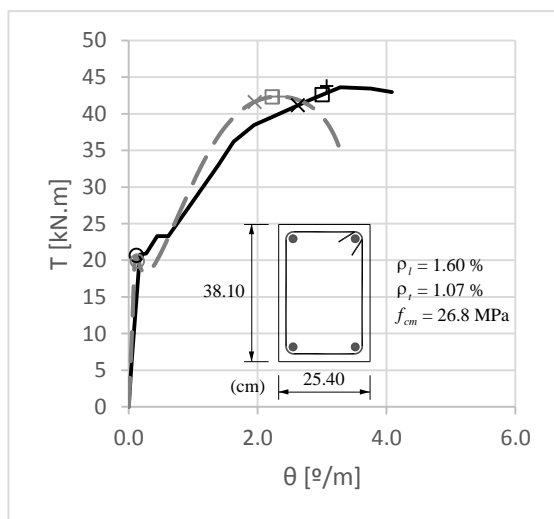


Fig. III.29 - Curvas T - θ da viga M3 (Hsu [18])

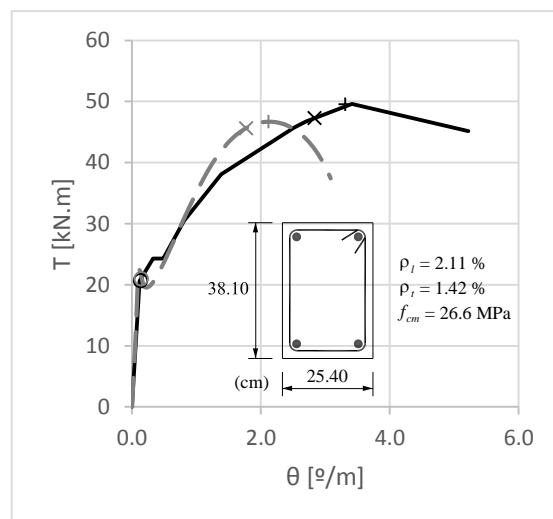


Fig. III.30 - Curvas T - θ da viga M4 (Hsu [18])

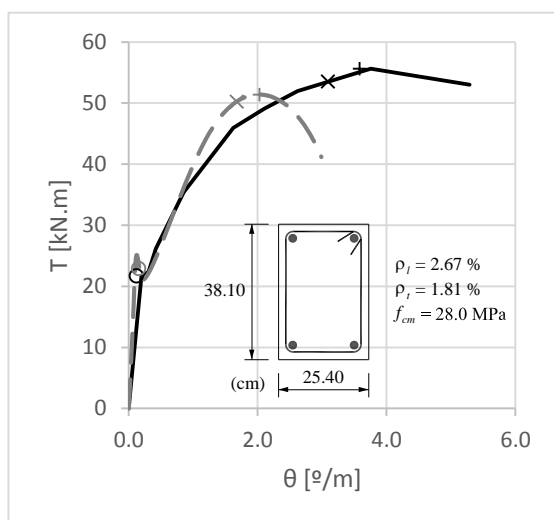


Fig. III.31 - Curvas T - θ da viga M5 (Hsu [18])

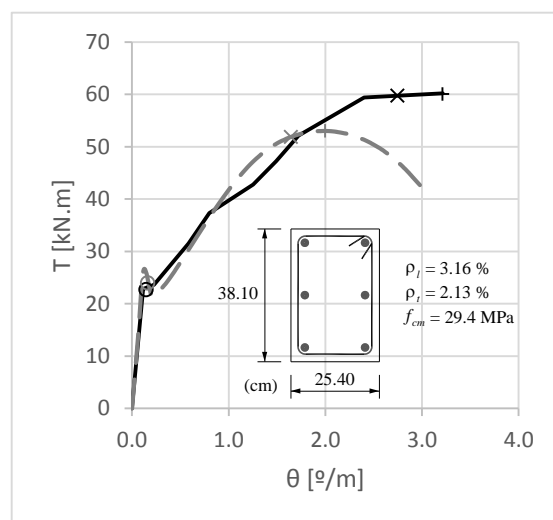


Fig. III.32 - Curvas T - θ da viga M6 (Hsu [18])

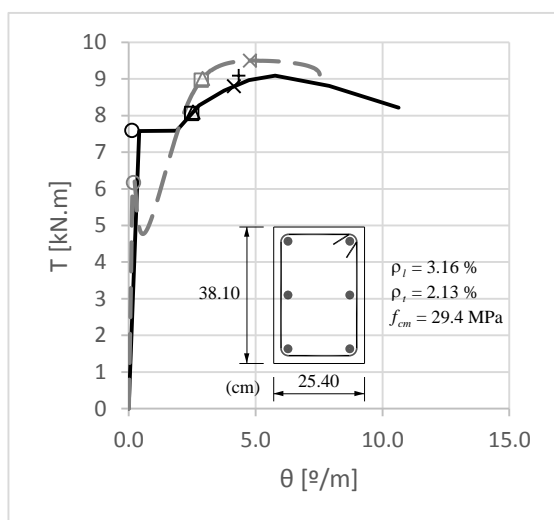


Fig. III.33 - Curvas T - θ da viga N1 (Hsu [18])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

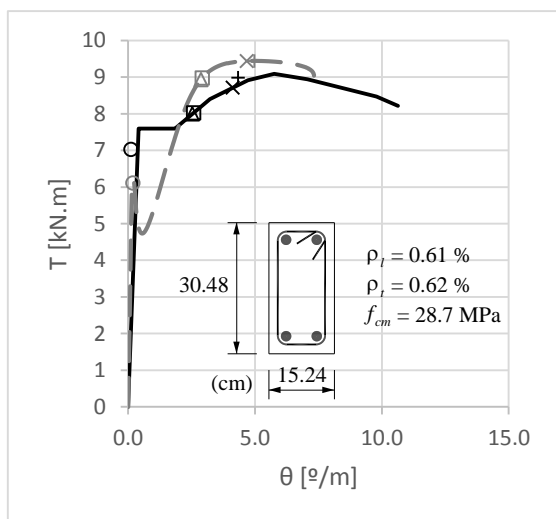


Fig. III.34 - Curvas $T-\theta$ da viga N1a (Hsu [18])

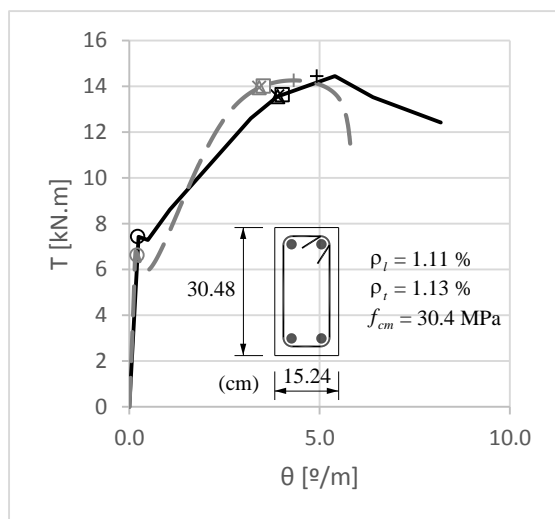


Fig. III.35 - Curvas $T-\theta$ da viga N2 (Hsu [18])

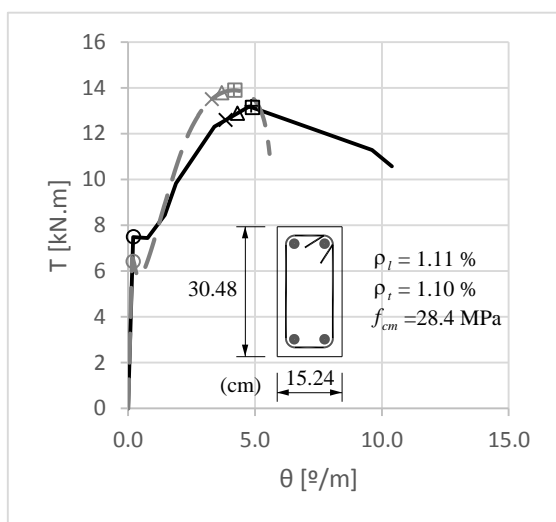


Fig. III.36 - Curvas $T-\theta$ da viga N2a (Hsu [18])

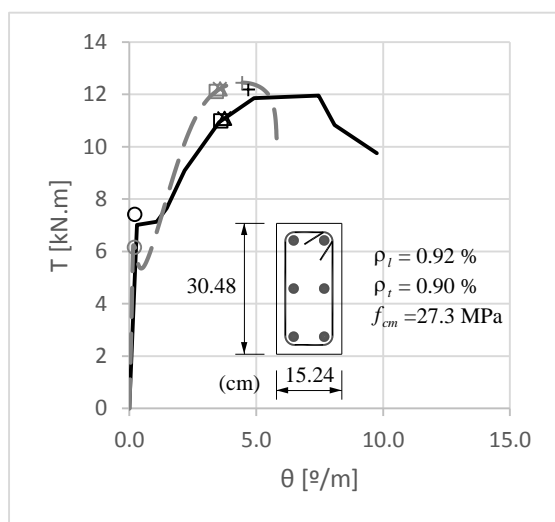


Fig. III.37 - Curvas $T-\theta$ da viga N3 (Hsu [18])

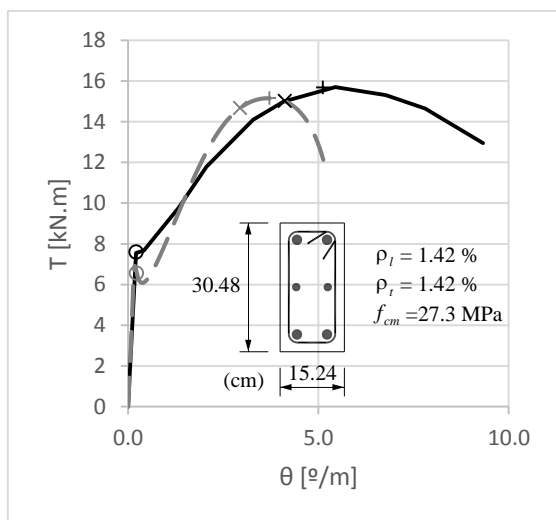


Fig. III.38 - Curvas $T-\theta$ da viga N4 (Hsu [18])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

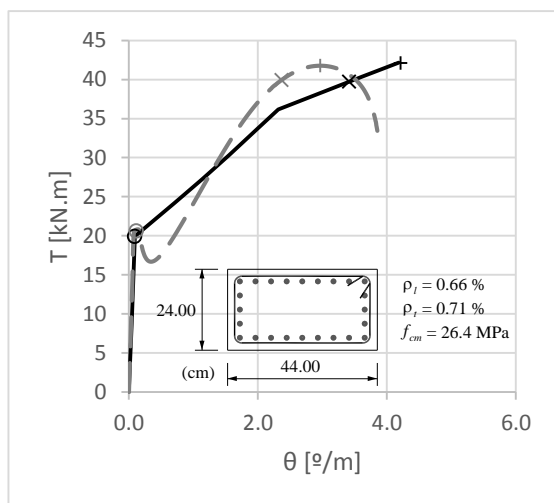


Fig. III.39 - Curvas T - θ da viga VB2 (Leonhardt e Schelling [26])

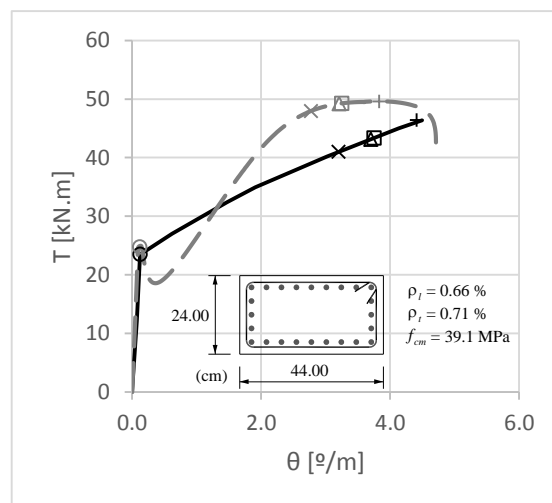


Fig. III.40 - Curvas T - θ da viga VB3 (Leonhardt e Schelling [26])

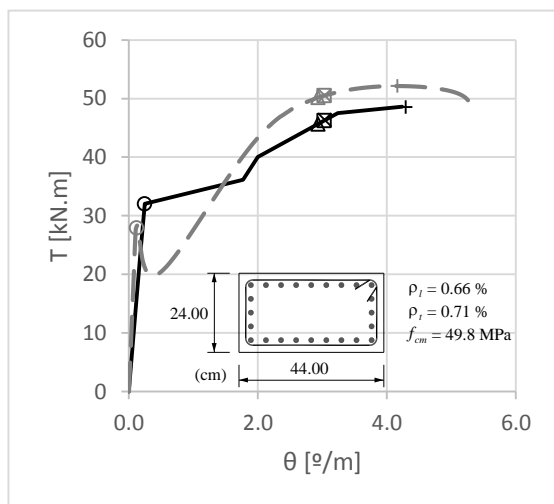


Fig. III.41 - Curvas T - θ da viga VB4 (Leonhardt e Schelling [26])

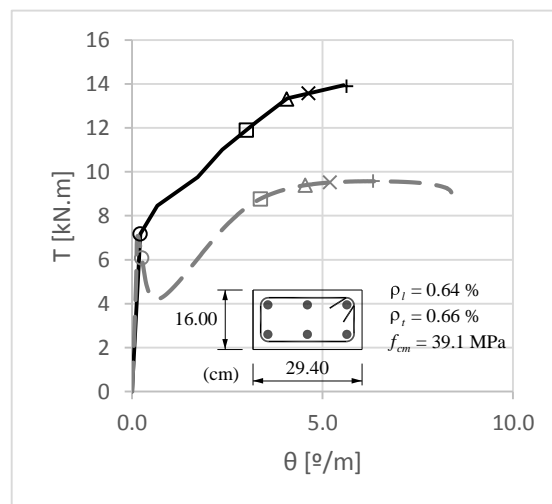


Fig. III.42 - Curvas T - θ da viga VM1 (Leonhardt e Schelling [26])

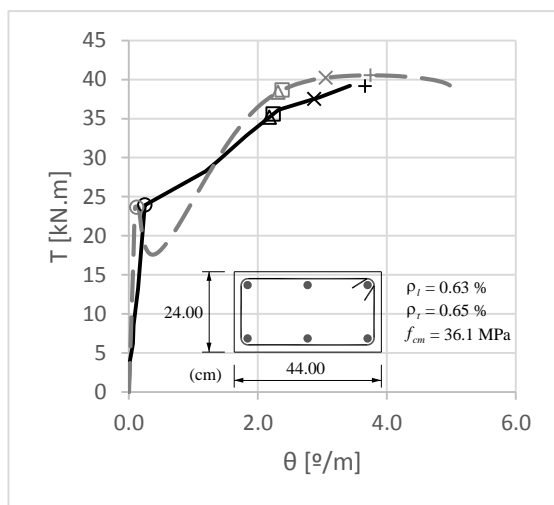


Fig. III.43 - Curvas T - θ da viga VM2 (Leonhardt e Schelling [26])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

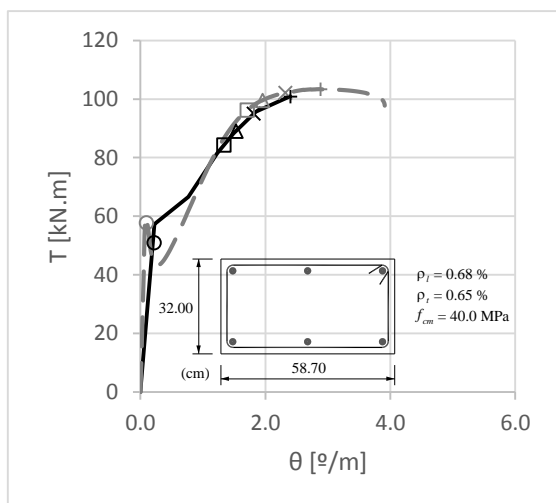


Fig. III.44 - Curvas T - θ da viga VM3 (Leonhardt e Schelling [26])

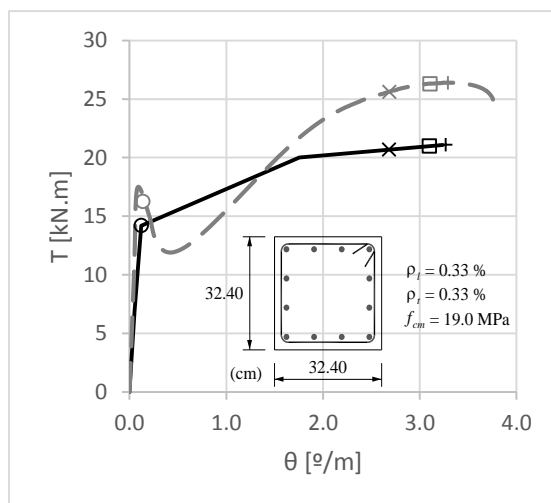


Fig. III.45 - Curvas T - θ da viga VQ1 (Leonhardt e Schelling [26])

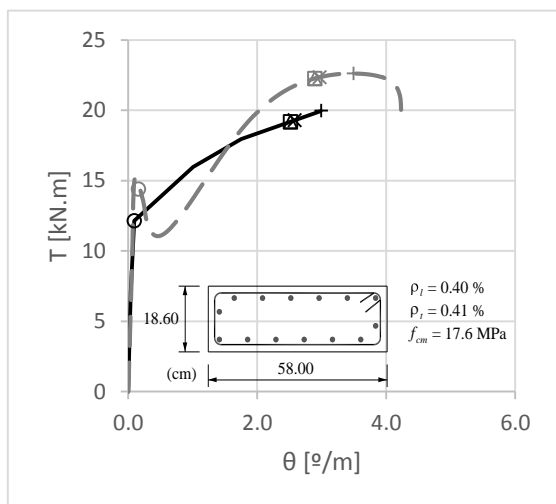


Fig. III.46 - Curvas T - θ da viga VQ3 (Leonhardt e Schelling [26])

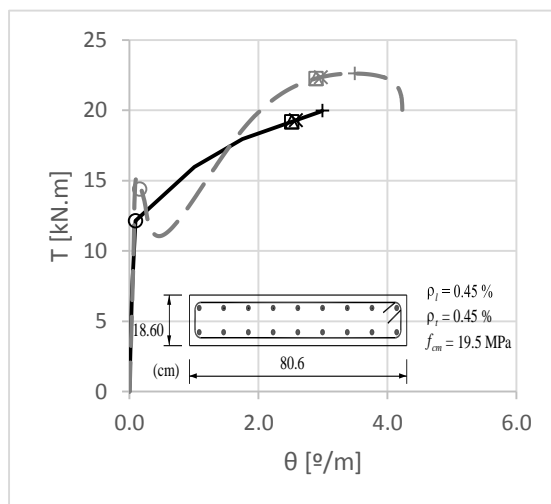


Fig. III.47 - Curvas T - θ da viga VQ9 (Leonhardt e Schelling [26])

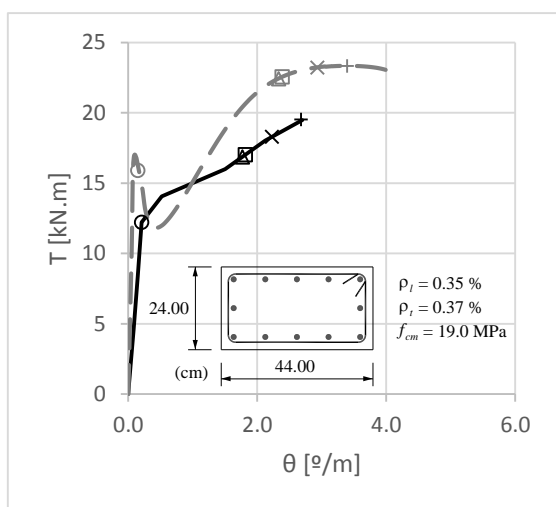


Fig. III.48 - Curvas T - θ da viga VS2-VQ2 (Leonhardt e Schelling [26])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

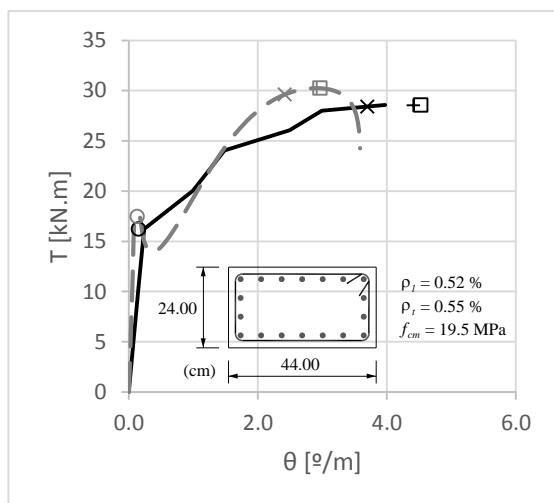


Fig. III.49 - Curvas T - θ da viga VS3 (Leonhardt e Schelling [26])

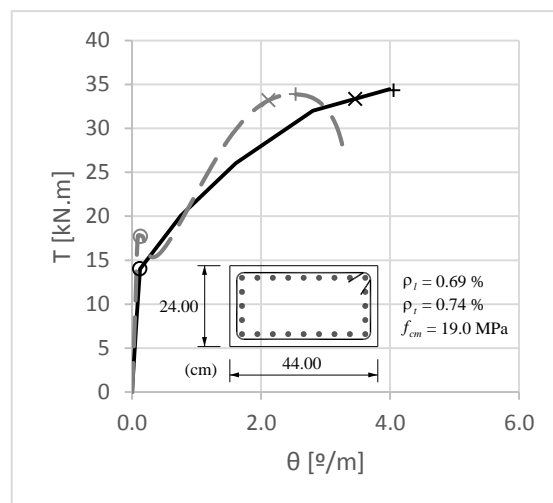


Fig. III.50 - Curvas T - θ da viga VS4-VQ5 (Leonhardt e Schelling [26])

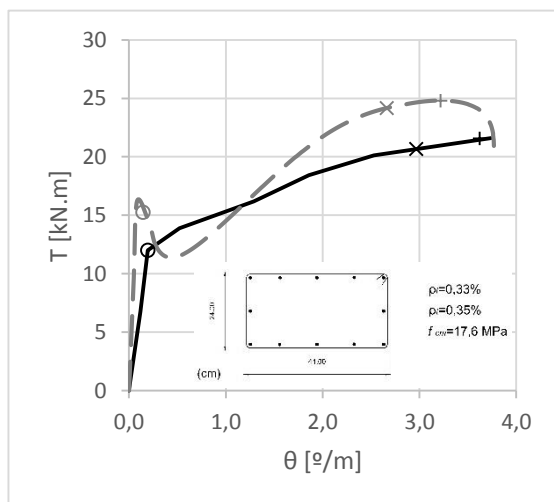


Fig. III.51 - Curvas T - θ da viga VS9 (Leonhardt e Schelling [26])

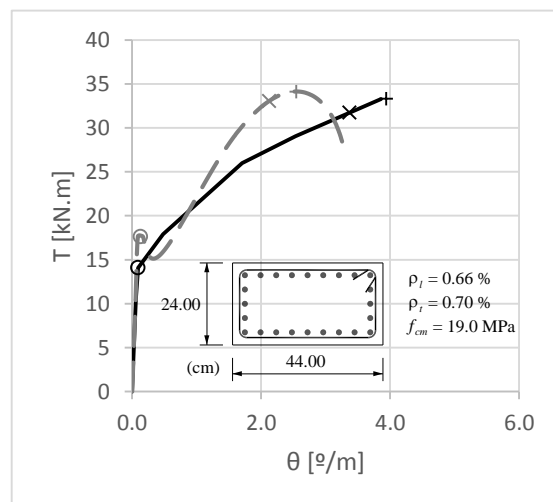


Fig. III.52 - Curvas T - θ da viga VS10-VB1 (Leonhardt e Schelling [26])

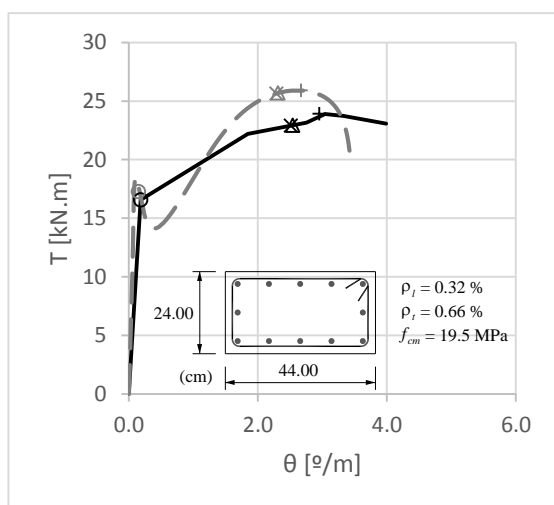


Fig. III.53 - Curvas T - θ da viga VU1 (Leonhardt e Schelling [26])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

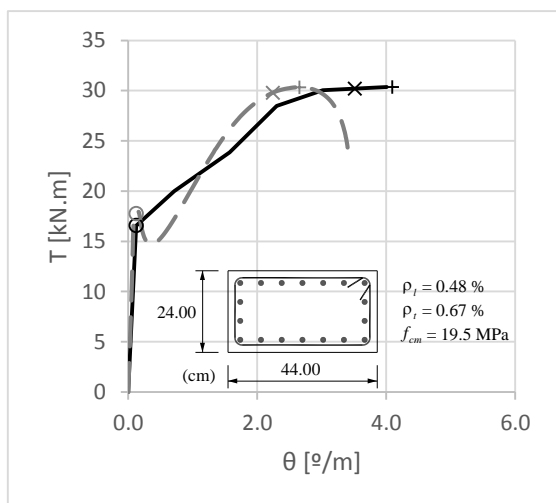


Fig. III.54 - Curvas $T-\theta$ da viga VU2 (Leonhardt e Schelling [26])

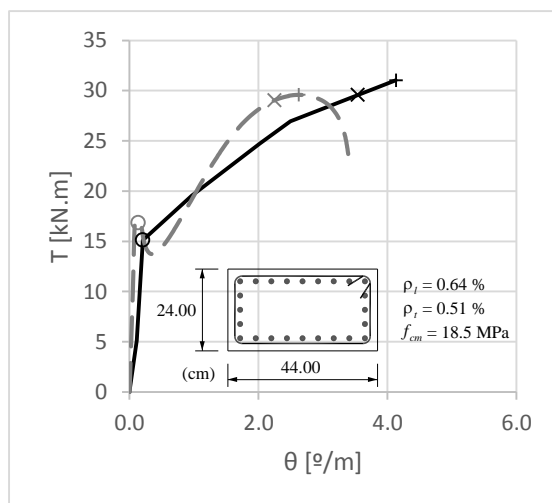


Fig. III.55 - Curvas $T-\theta$ da viga VU3 (Leonhardt e Schelling [26])

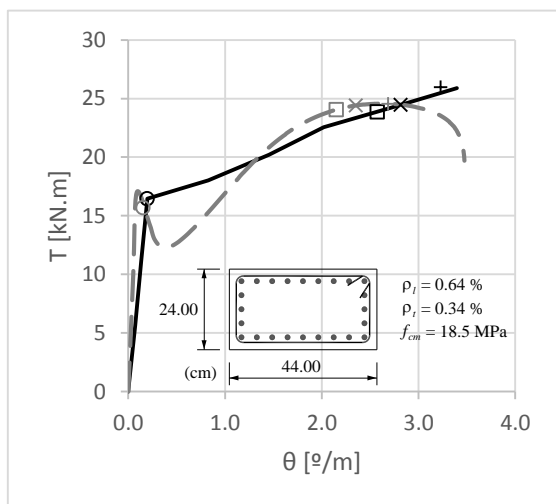


Fig. III.56 - Curvas $T-\theta$ da viga VU4 (Leonhardt e Schelling [26])

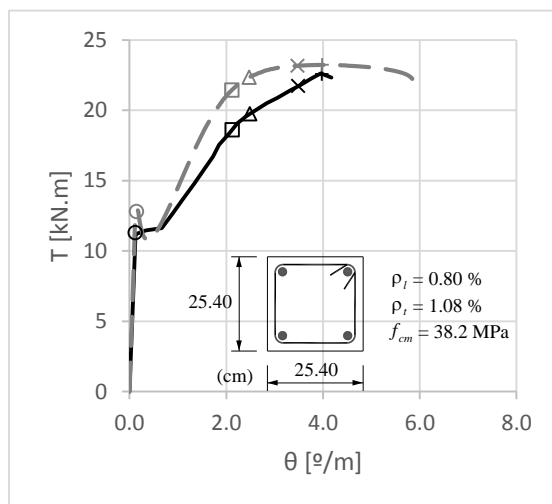


Fig. III.57 - Curvas $T-\theta$ da viga A2 (McMullen e Rangan [27])

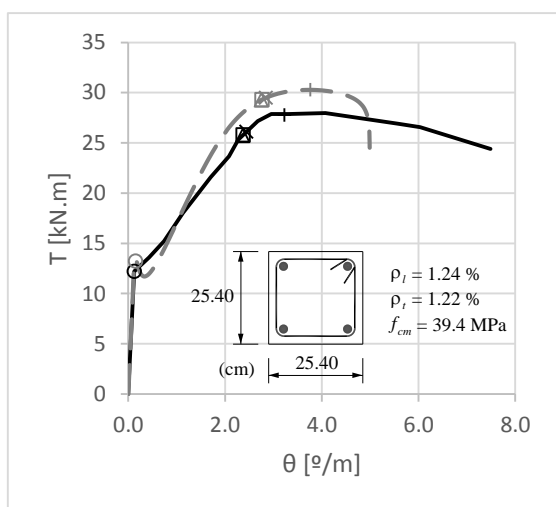


Fig. III.58 - Curvas $T-\theta$ da viga A3 (McMullen e Rangan [27])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

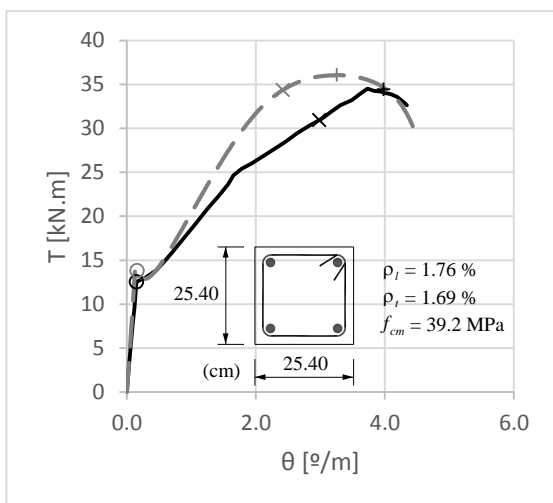


Fig. III.59 - Curvas T - θ da viga A4 (McMullen e Rangan [27])

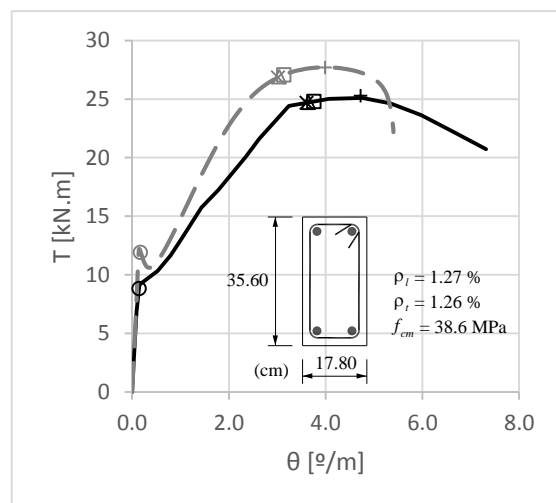


Fig. III.60 - Curvas T - θ da viga B3 (McMullen e Rangan [27])

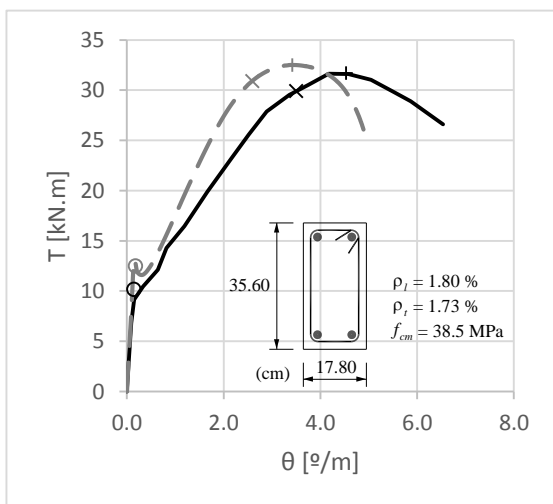


Fig. III.61 - Curvas T - θ da viga B4 (McMullen e Rangan [27])

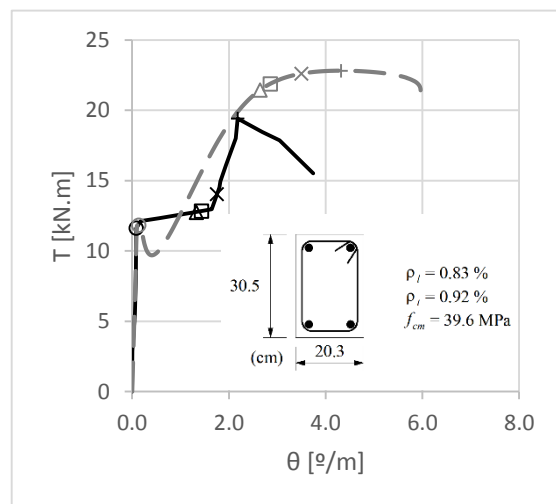


Fig. III.62 - Curvas T - θ da viga B5UR1 (Koutchali e Belarbi [24])

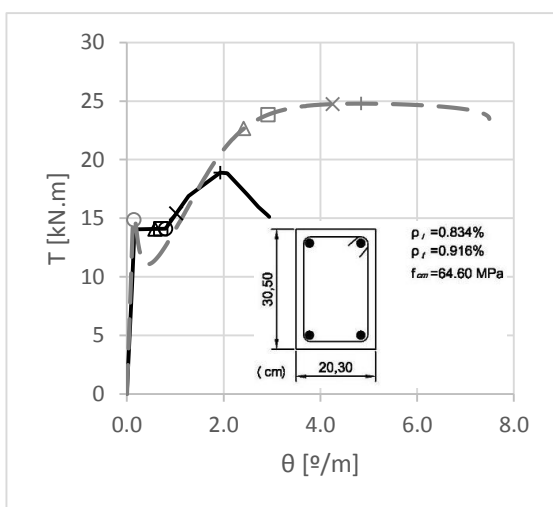


Fig. III.63 - Curvas T - θ da viga B7UR1 (Koutchali e Belarbi [24])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

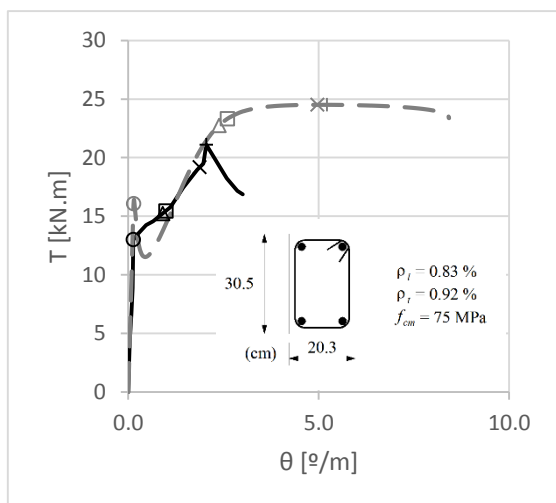


Fig. III.64 - Curvas $T-\theta$ da viga B9UR1 (Koutchkali e Belarbi [24])

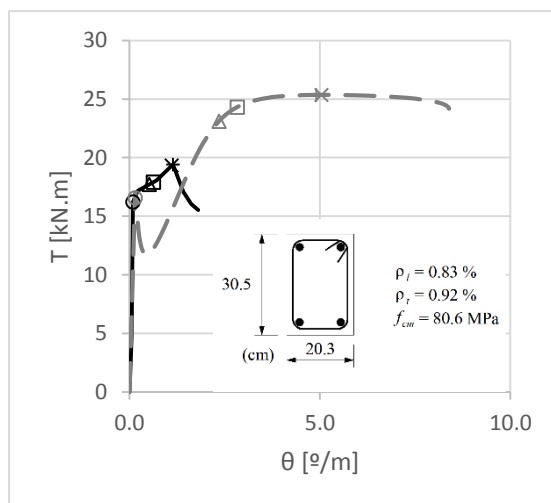


Fig. III.65 - Curvas $T-\theta$ da viga B12UR1 (Koutchkali e Belarbi [24])

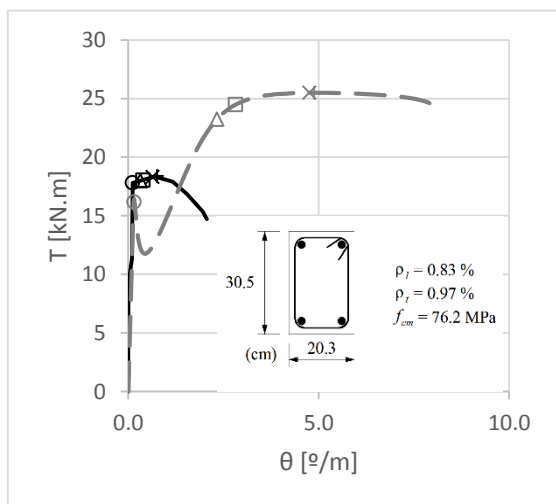


Fig. III.66 - Curvas $T-\theta$ da viga B12UR2 (Koutchkali e Belarbi [24])

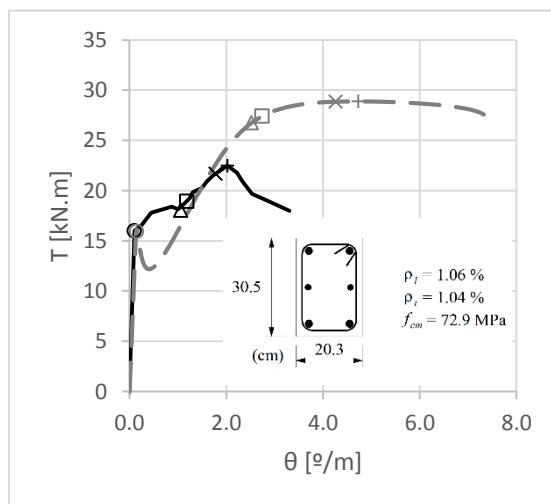


Fig. III.67 - Curvas $T-\theta$ da viga B12UR3 (Koutchkali e Belarbi [24])

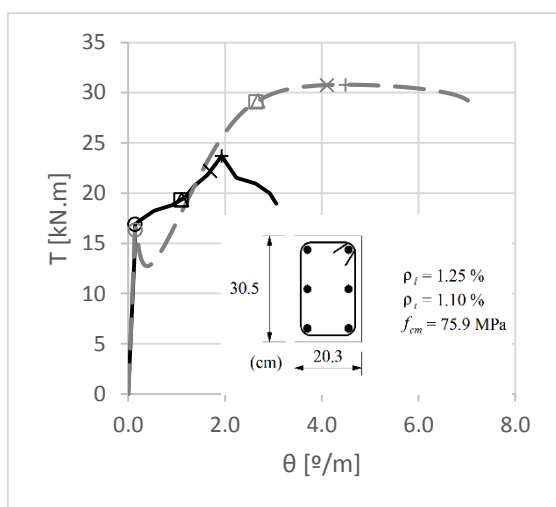


Fig. III.68 - Curvas $T-\theta$ da viga B12UR4 (Koutchkali e Belarbi [24])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

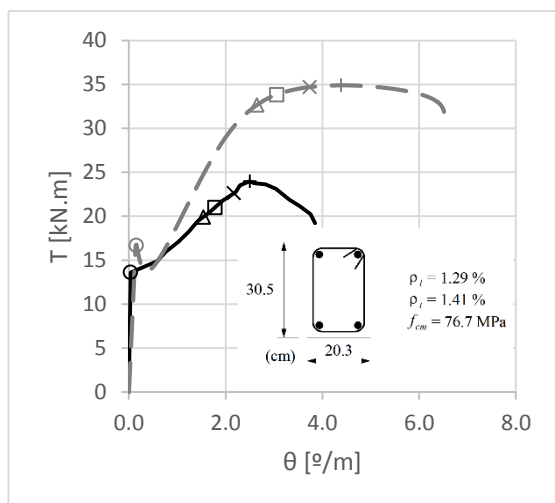


Fig. III.69 - Curvas T - θ da viga B12UR5 (Koutchali e Belarbi [24])

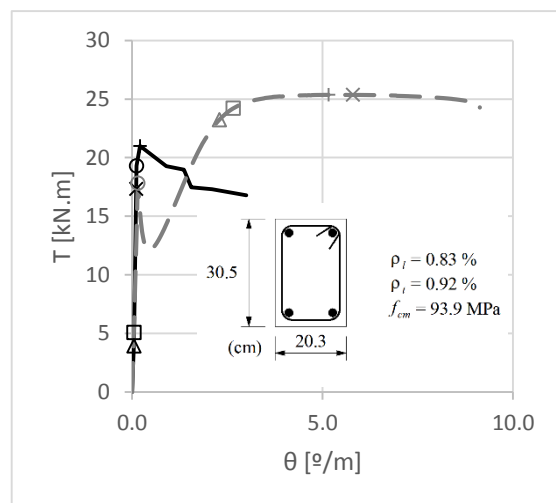


Fig. III.70 - Curvas T - θ da viga B14UR1 (Koutchali e Belarbi [24])

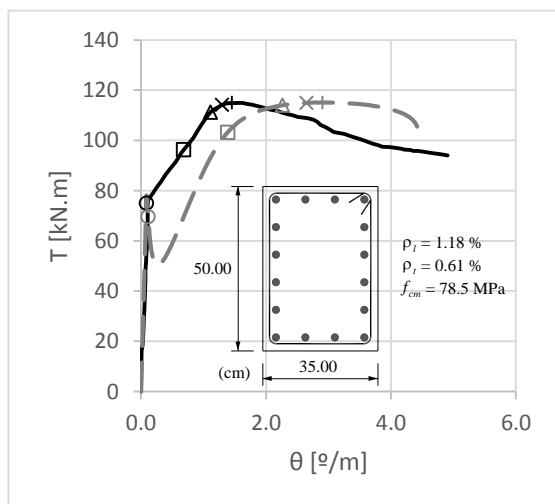


Fig. III.71 - Curvas T - θ da viga H-06-12 (Fang e Shiau [15])

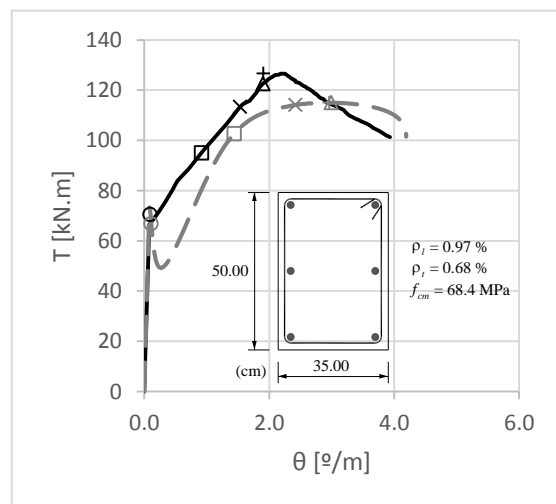


Fig. III.72 - Curvas T - θ da viga H-07-10 (Fang e Shiau [15])

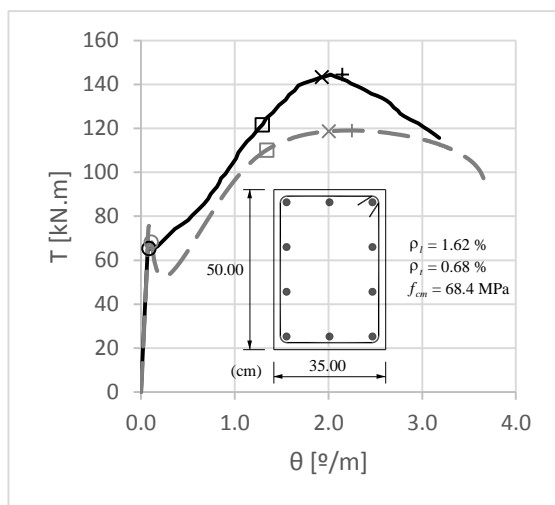


Fig. III.73 - Curvas T - θ da viga H-07-16 (Fang e Shiau [15])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

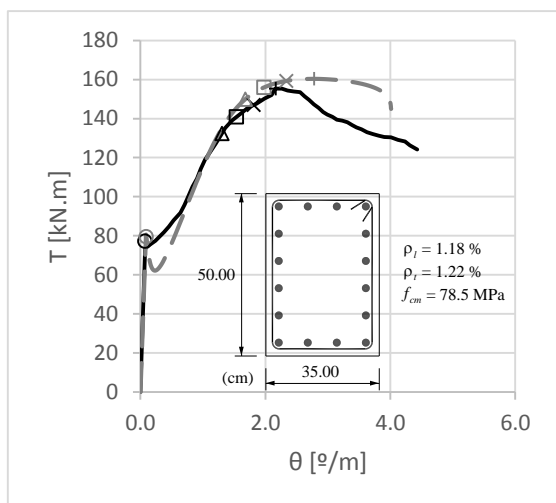


Fig. III.74 - Curvas T - θ da viga H-12-12 (Fang e Shiau [15])

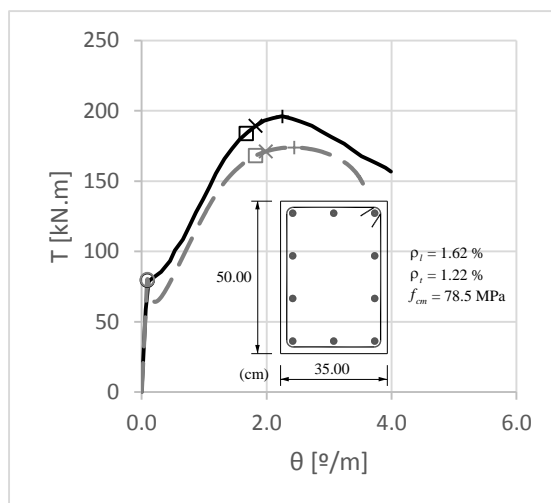


Fig. III.75 - Curvas T - θ da viga H-12-16 (Fang e Shiau [15])

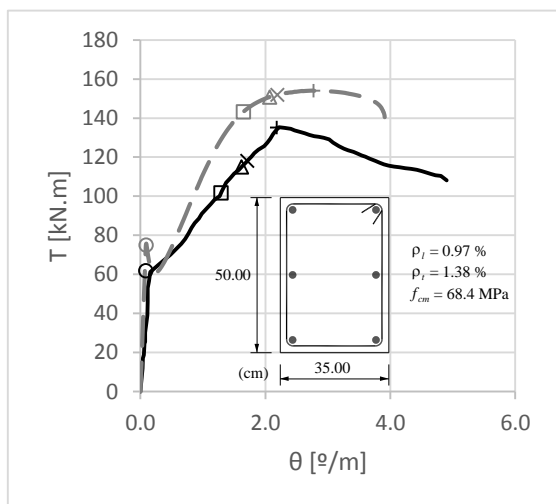


Fig. III.76 - Curvas T - θ da viga H-14-10 (Fang e Shiau [15])

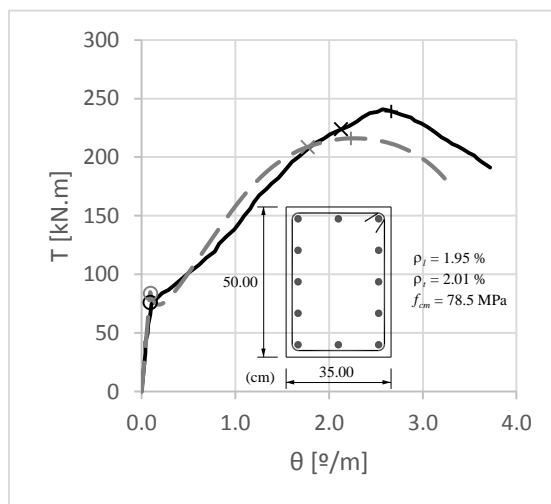


Fig. III.77 - Curvas T - θ da viga H-20-20 (Fang e Shiau [15])

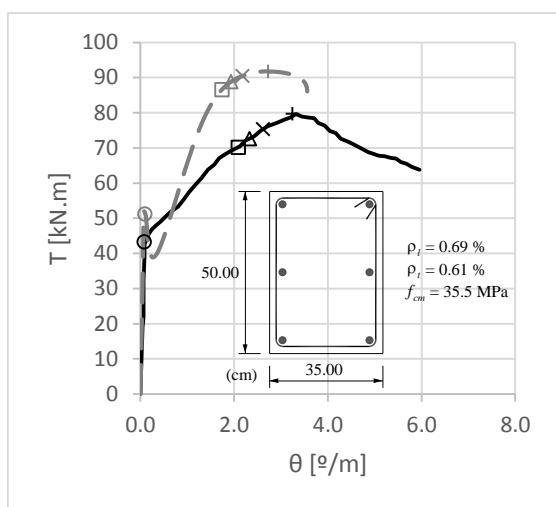


Fig. III.78 - Curvas T - θ da viga N-06-06 (Fang e Shiau [15])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

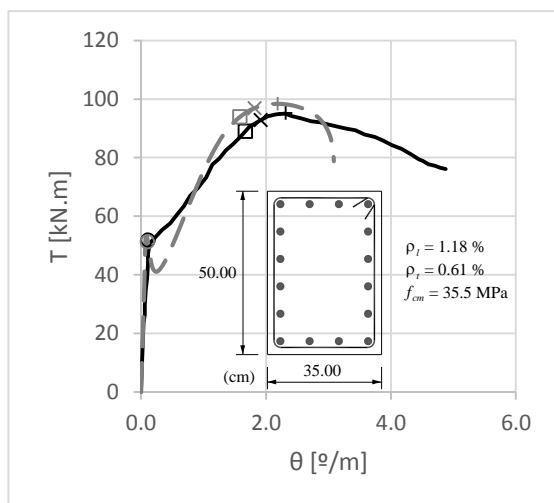


Fig. III.79 - Curvas T - θ da viga N-06-12 (Fang e Shiau [15])

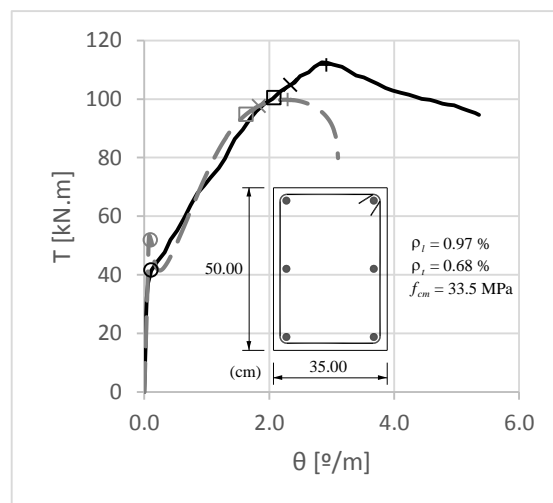


Fig. III.80 - Curvas T - θ da viga N-07-10 (Fang e Shiau [15])

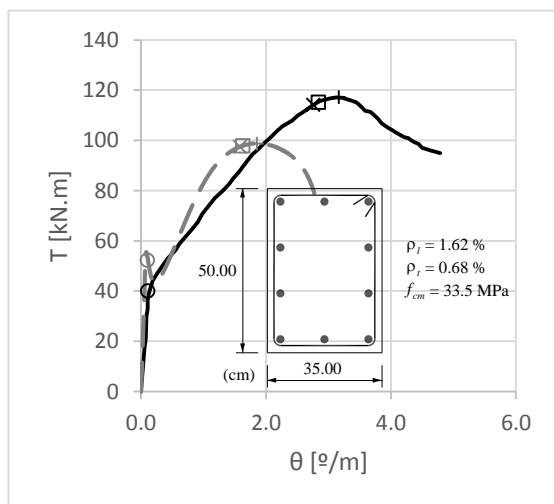


Fig. III.81 - Curvas T - θ da viga N-07-16 (Fang e Shiau [15])

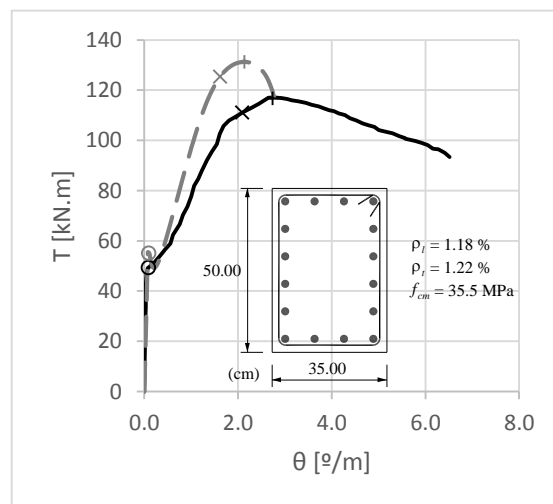


Fig. III.82 - Curvas T - θ da viga N-12-12 (Fang e Shiau [15])

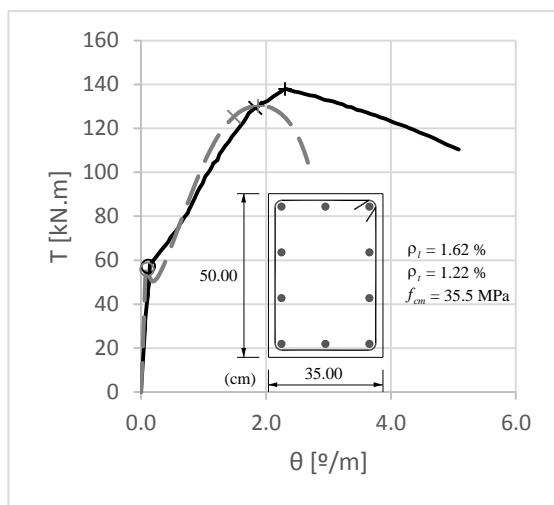


Fig. III.83 - Curvas T - θ da viga N-12-16 (Fang e Shiau [15])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

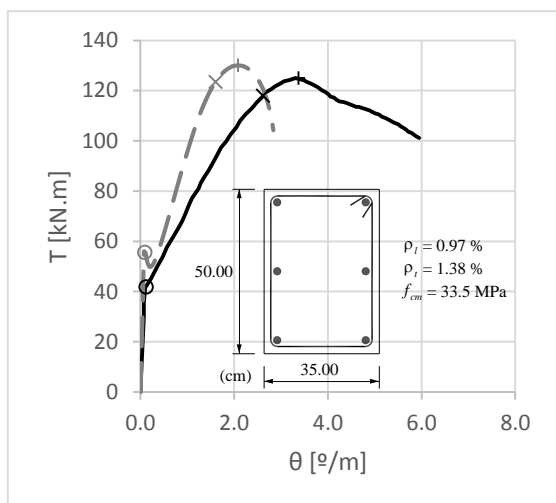


Fig. III.84 - Curvas $T-\theta$ da viga N-14-10 (Fang e Shiau [15])

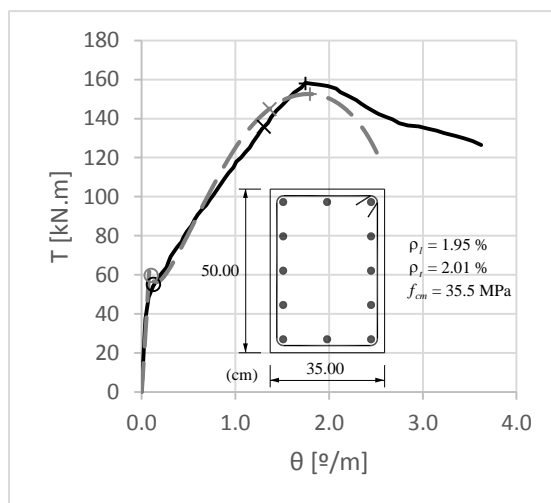


Fig. III.85 - Curvas $T-\theta$ da viga N-20-20 (Fang e Shiau [15])

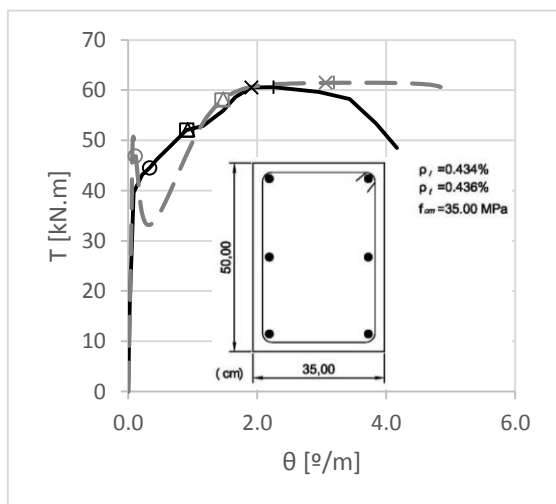


Fig. III.86 - Curvas $T-\theta$ da viga NBS-43-44 (Chiu, Fang, Young e Shiau [13])

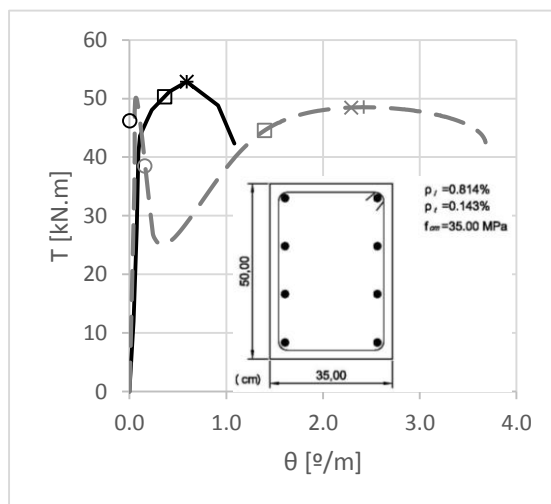


Fig. III.87 - Curvas $T-\theta$ da viga NBS-82-13 (Chiu, Fang, Young e Shiau [13])

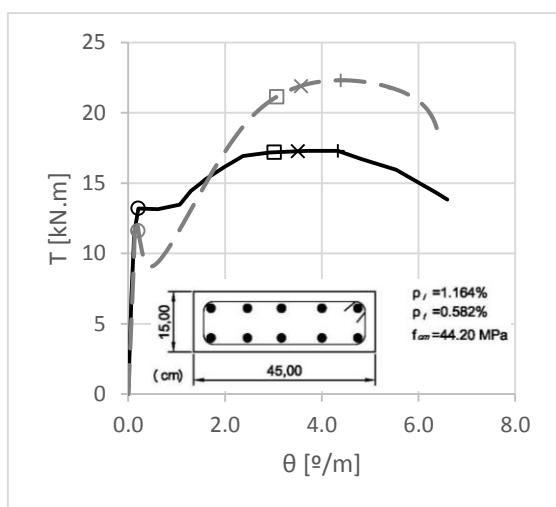


Fig. III.88 - Curvas $T-\theta$ da viga SW4-1 (Peng e Wong [29])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

Vigas de Secção Vazada

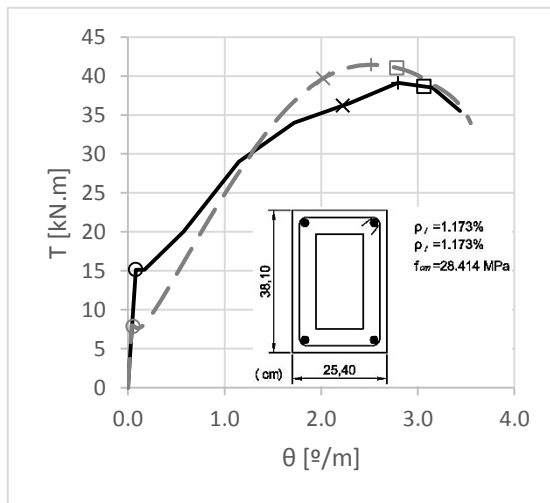


Fig. III.89 - Curvas $T-\theta$ da viga D3 (Hsu [18])

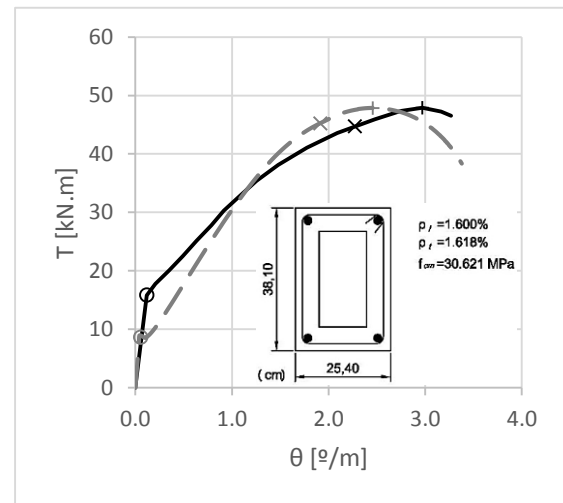


Fig. III.90 - Curvas $T-\theta$ da viga D4 (Hsu [18])

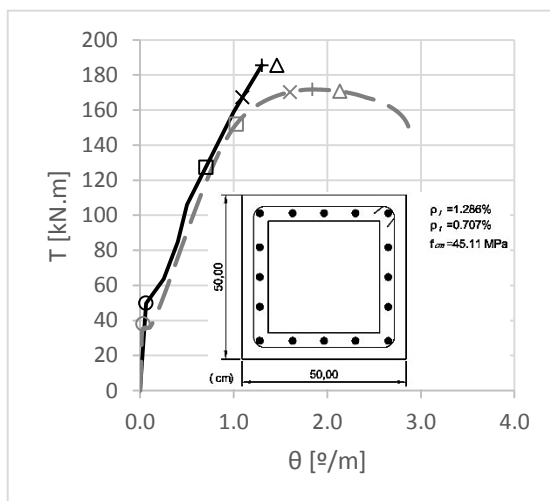
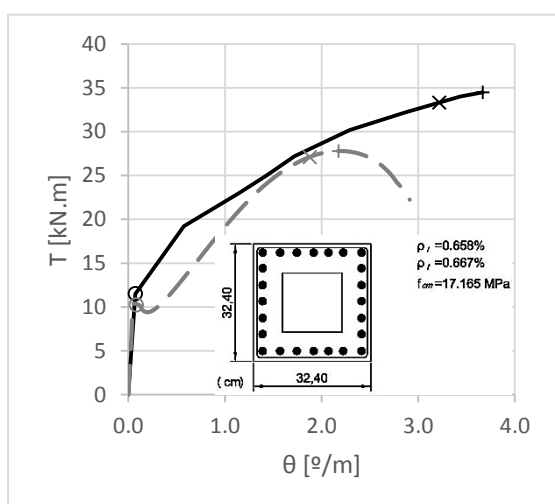
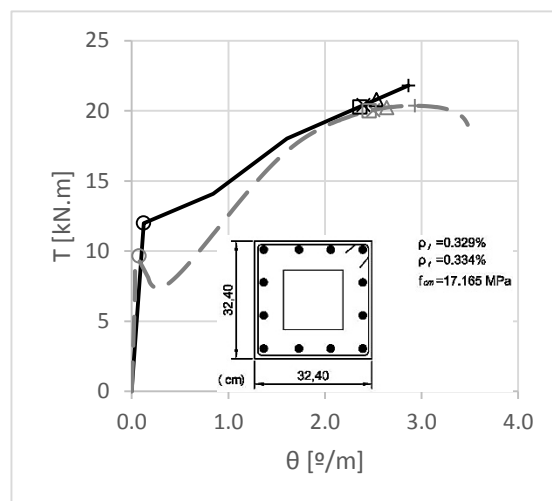
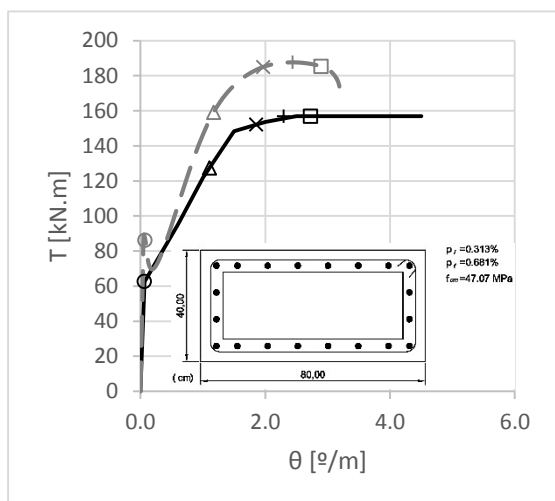
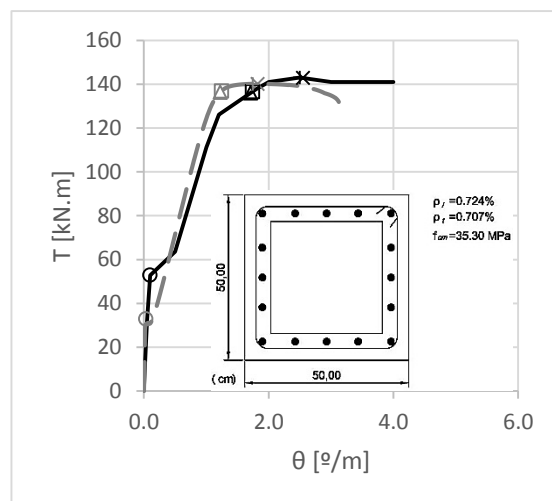
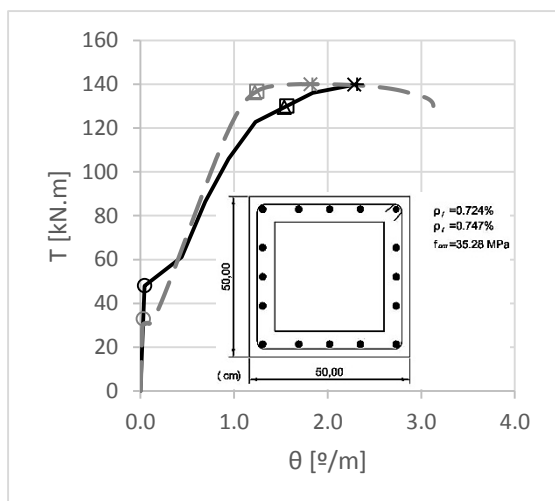


Fig. III.91 - Curvas $T-\theta$ da viga T0 (Lampert e Thurlimann [27])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.



Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

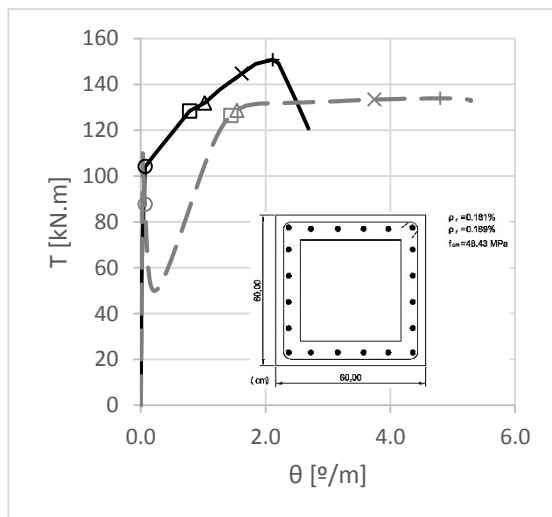


Fig. III.97 - Curvas $T-\theta$ da viga A1 (Bernardo [7])

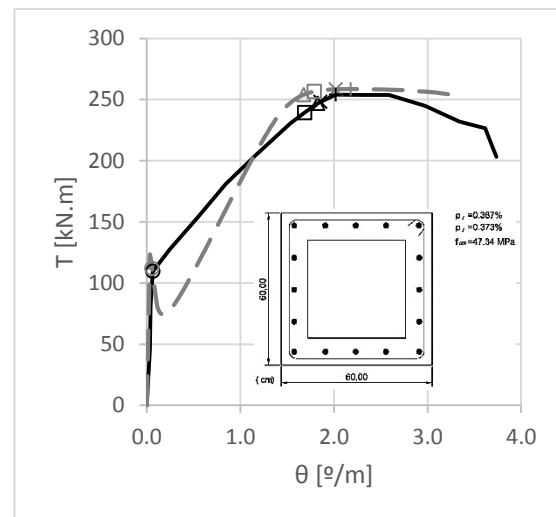


Fig. III.98 - Curvas $T-\theta$ da viga A2 (Bernardo [7])

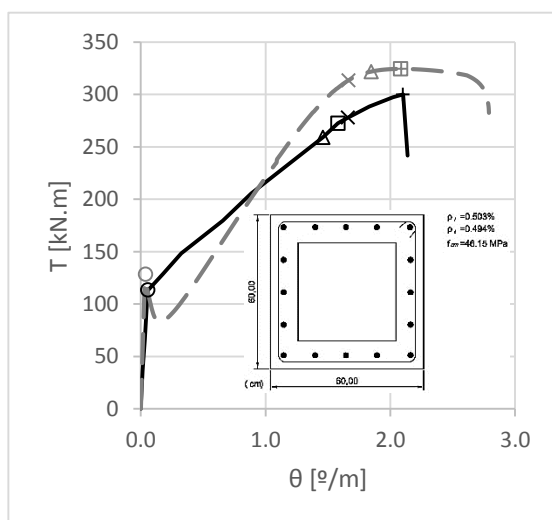


Fig. III.99 - Curvas $T-\theta$ da viga A3 (Bernardo [7])

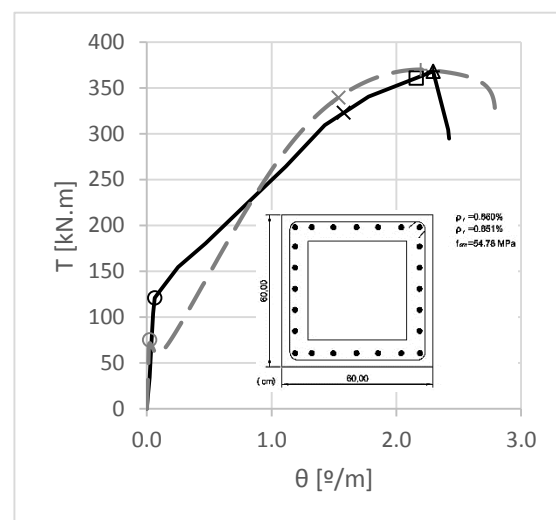


Fig. III.100 - Curvas $T-\theta$ da viga A4 (Bernardo [7])

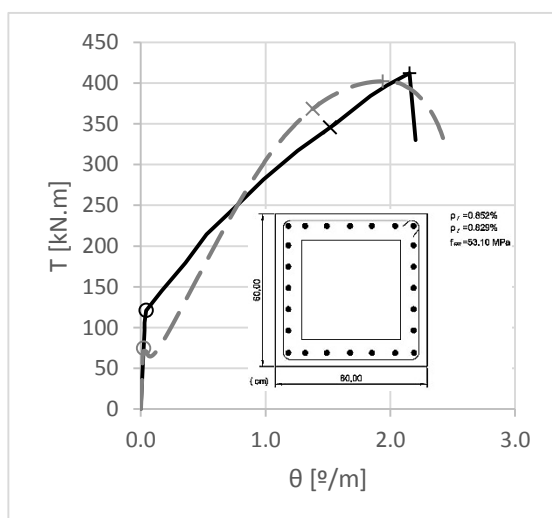


Fig. III.101 - Curvas $T-\theta$ da viga A5 (Bernardo [7])

Legenda:

— Curva Exp.

— Curva Teo.

○ Fissuração

× 'Cedência' betão

△ Cedência Asl

□ Cedência Ast

+ Tensão máx.

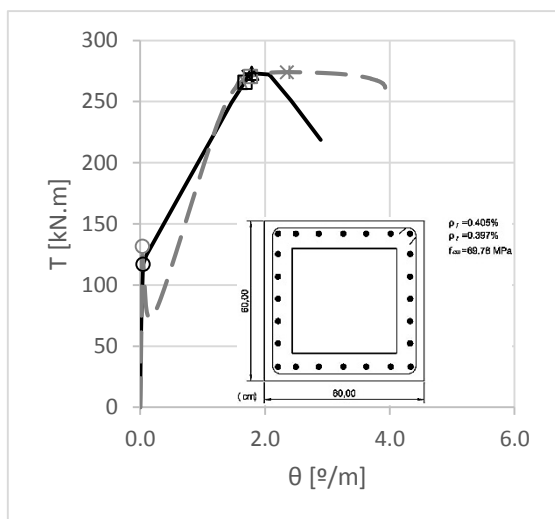


Fig. III.102 - Curvas $T-\theta$ da viga B2 (Bernardo [7])

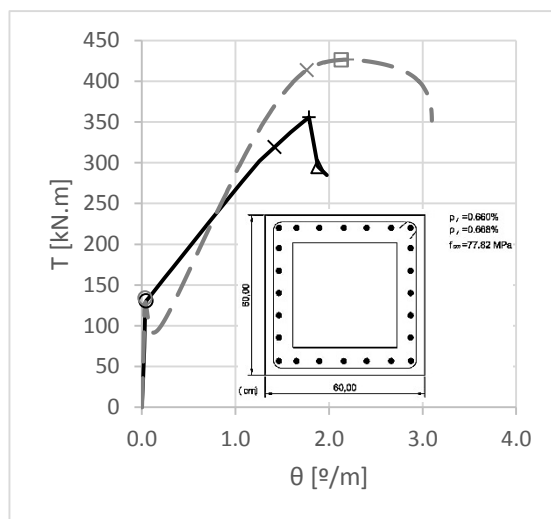


Fig. III.103 - Curvas $T-\theta$ da viga B3 (Bernardo [7])

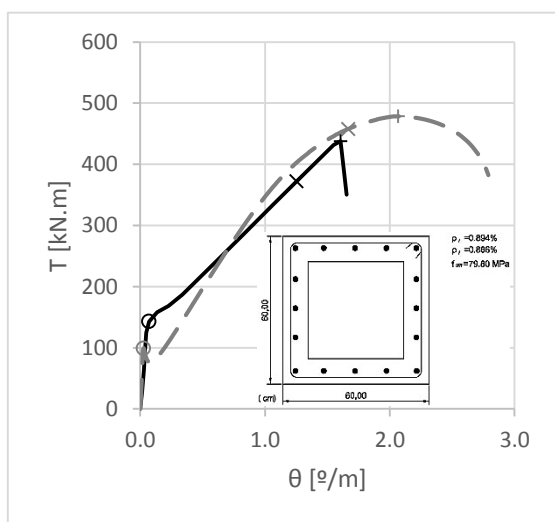


Fig. III.104 - Curvas $T-\theta$ da viga B4 (Bernardo [7])

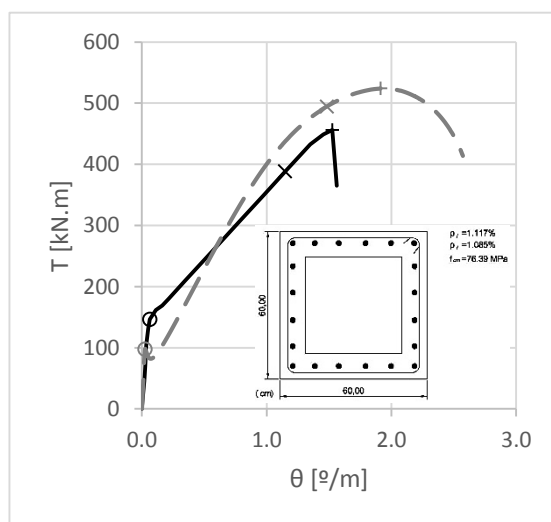


Fig. III.105 - Curvas $T-\theta$ da viga B5 (Bernardo [7])

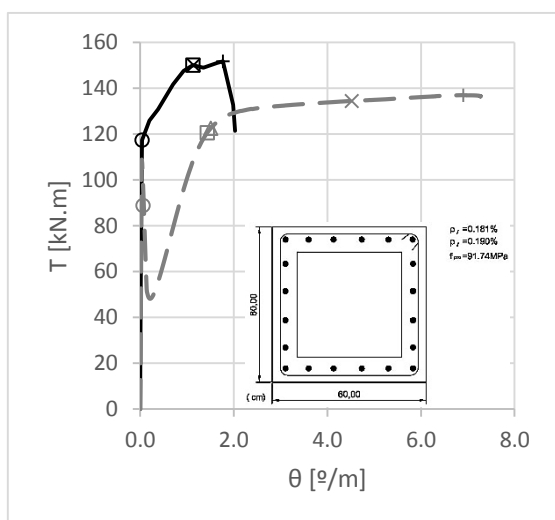


Fig. III.106 - Curvas $T-\theta$ da viga C1 (Bernardo [7])

Legenda:

- Curva Exp.
- - - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

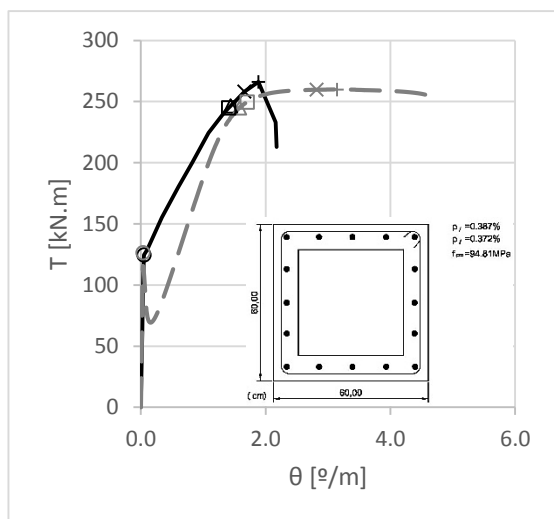


Fig. III.107 - Curvas $T-\theta$ da viga C2 (Bernardo [7])

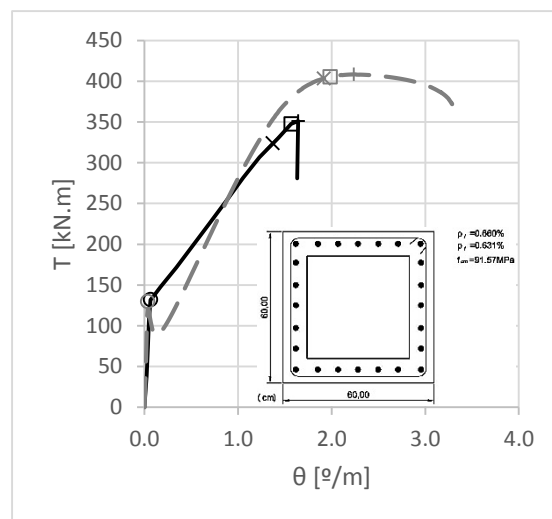


Fig. III.108 - Curvas $T-\theta$ da viga C3 (Bernardo [7])

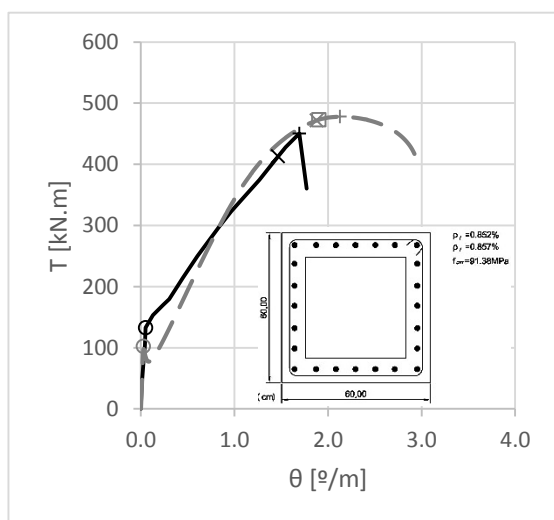


Fig. III.109 - Curvas $T-\theta$ da viga C4 (Bernardo [7])

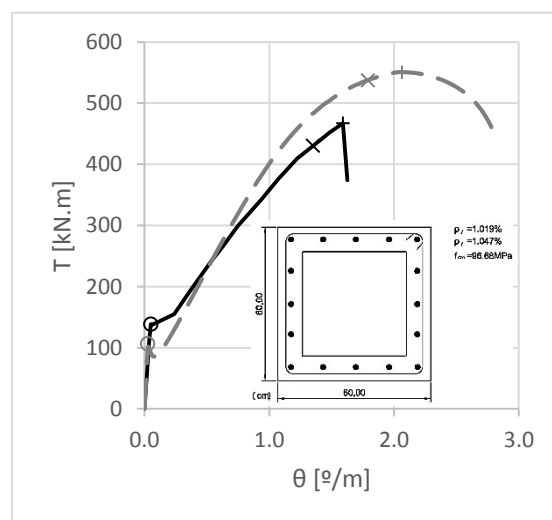


Fig. III.110 - Curvas $T-\theta$ da viga C5 (Bernardo [7])

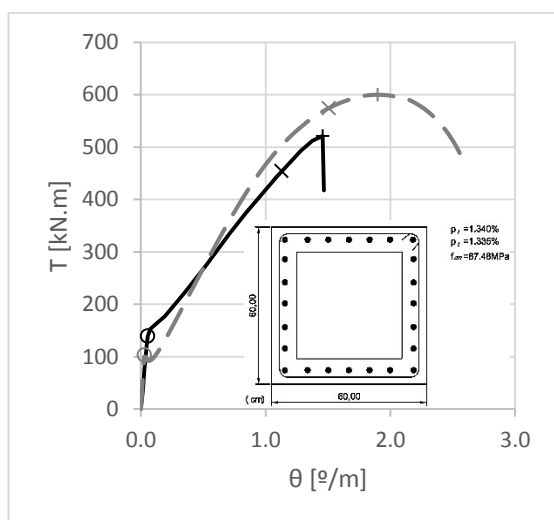


Fig. III.111 - Curvas $T-\theta$ da viga C6 (Bernardo [7])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

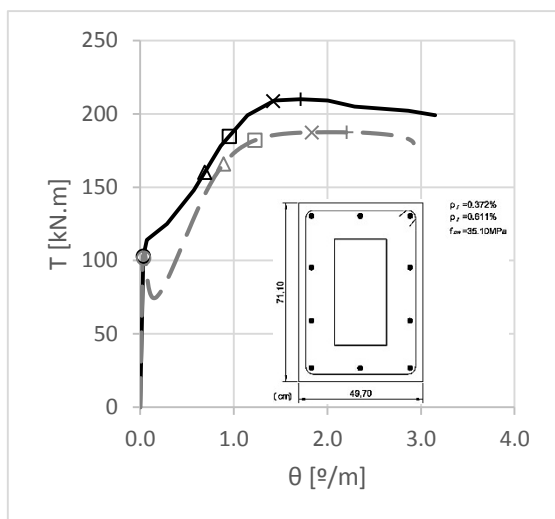


Fig. III.112 - Curvas $T-\theta$ da viga A095c (Jeng [23])

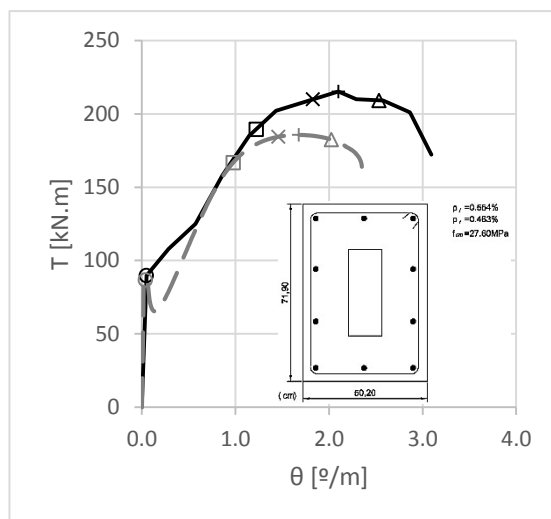


Fig. III.113 - Curvas $T-\theta$ da viga A120a (Jeng [23])

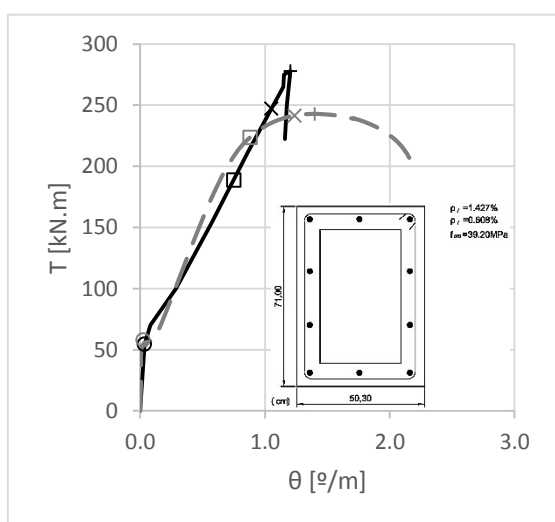


Fig. III.114 - Curvas $T-\theta$ da viga B065b (Jeng [23])

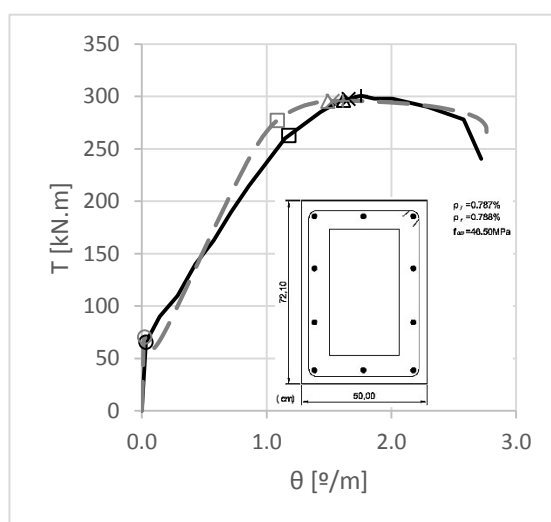


Fig. III.115 - Curvas $T-\theta$ da viga B080a (Jeng [23])

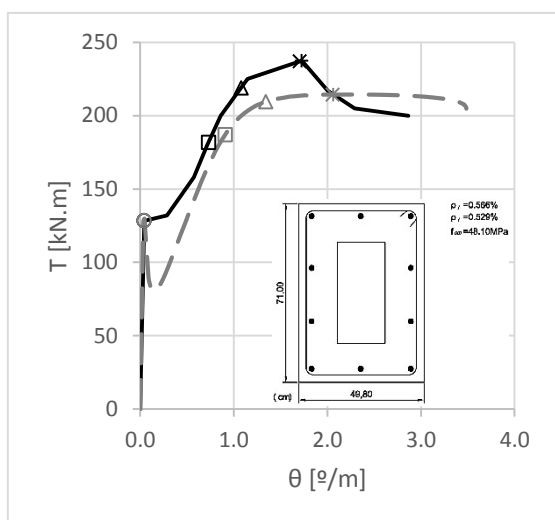


Fig. III.116 - Curvas $T-\theta$ da viga B110a (Jeng [23])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

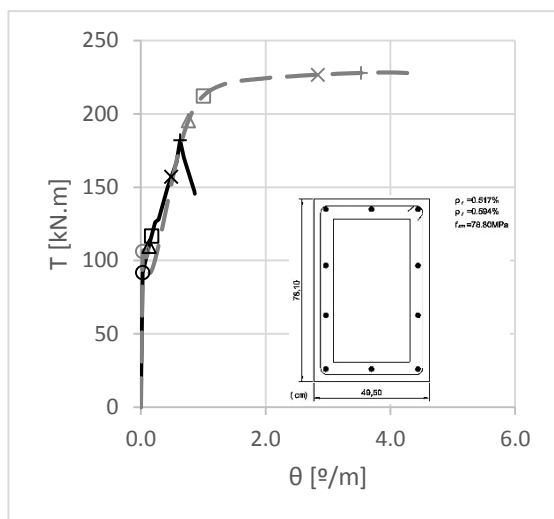


Fig. III.117 - Curvas $T-\theta$ da viga C065a (Jeng [23])

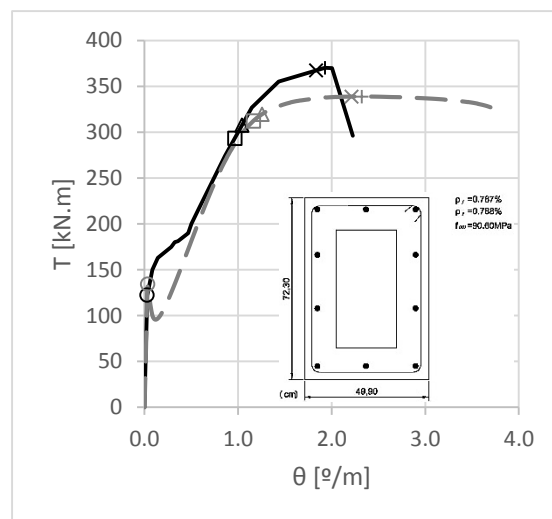


Fig. III.118 - Curvas $T-\theta$ da viga C100a (Jeng [23])

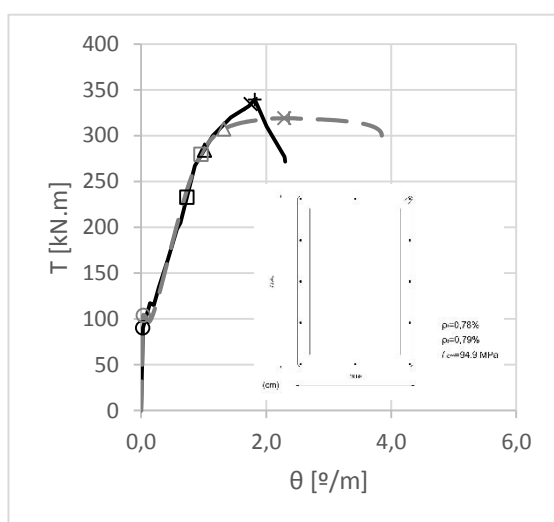


Fig. III.119 - Curvas $T-\theta$ da viga D075a (Jeng [23])

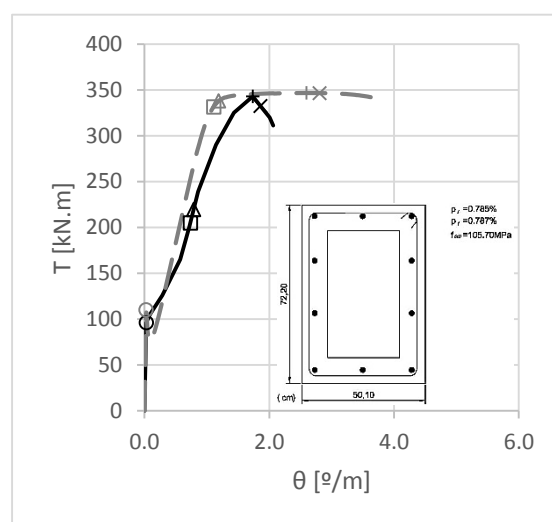


Fig. III.120 - Curvas $T-\theta$ da viga D090a (Jeng [23])

Legenda:

- Curva Exp.
- - Curva Teo.
- Fissuração
- × 'Cedência' betão
- △ Cedência Asl
- Cedência Ast
- + Tensão máx.

Anexo IV. Índices de Ductilidade

Quadro IV - Índices de Ductilidade Experimentais e Teóricos

Viga	Tipo de secção	θ_u^{exp} (°/m)	θ_y^{exp} (°/m)	μ_θ^{exp}	θ_u^{teo} (°/m)	θ_y^{teo} (°/m)	μ_θ^{teo}
B3 [18]	Cheia	3,865	2,366	1,633	3,604	2,139	1,685
B4 [18]	Cheia	4,630	2,561	1,808	3,370	1,905	1,769
B5 [18]	Cheia	5,104	2,850	1,791	3,217	1,760	1,828
B6 [18]	Cheia	4,406	3,050	1,445	2,989	1,630	1,834
B7 [18]	Cheia	4,521	1,716	2,634	3,565	1,565	2,278
B8 [18]	Cheia	3,747	2,546	1,472	2,991	1,754	1,705
B9 [18]	Cheia	4,337	1,730	2,508	3,944	1,576	2,503
C4 [18]	Cheia	5,907	3,679	1,606	3,745	2,125	1,762
C5 [18]	Cheia	8,833	3,979	2,220	3,519	1,951	1,804
C6 [18]	Cheia	7,297	4,428	1,648	3,346	1,811	1,847
G3 [18]	Cheia	3,887	2,030	1,915	3,501	1,848	1,894
G4 [18]	Cheia	3,817	2,470	1,545	3,311	1,947	1,701
G5 [18]	Cheia	4,489	2,529	1,775	2,986	1,697	1,760
G7 [18]	Cheia	3,964	1,665	2,381	3,835	1,766	2,172
G8 [18]	Cheia	4,422	2,257	1,960	3,225	1,873	1,722
I3 [18]	Cheia	5,007	1,619	3,093	4,713	1,981	2,379
I4 [18]	Cheia	2,684	1,607	1,670	4,180	2,118	1,974
I5 [18]	Cheia	5,197	2,244	2,316	3,835	1,987	1,930
I6 [18]	Cheia	5,158	2,352	2,193	3,642	1,830	1,990
J1 [18]	Cheia	5,204	2,380	2,187	3,120	2,215	1,409
J2 [18]	Cheia	5,196	2,625	1,980	2,818	1,877	1,501
J3 [18]	Cheia	4,635	2,903	1,597	2,677	1,670	1,603
J4 [18]	Cheia	5,207	3,145	1,656	2,608	1,614	1,616
K2 [18]	Cheia	3,547	2,297	1,544	5,411	2,915	1,856
K3 [18]	Cheia	5,882	3,393	1,734	4,687	2,608	1,797
K4 [18]	Cheia	8,659	3,924	2,207	4,284	2,321	1,846
M1 [18]	Cheia	5,495	1,761	3,120	4,460	1,729	2,580
M2 [18]	Cheia	3,710	2,052	1,808	3,891	1,948	1,998
M3 [18]	Cheia	4,081	2,627	1,554	3,320	1,952	1,701
M4 [18]	Cheia	5,221	2,835	1,842	3,080	1,767	1,743
M5 [18]	Cheia	5,287	3,090	1,711	2,988	1,673	1,786
M6 [18]	Cheia	3,213	2,746	1,170	2,990	1,644	1,819
N1 [18]	Cheia	10,640	2,482	4,287	7,531	2,850	2,642
N1a [18]	Cheia	10,634	2,527	4,208	7,329	2,866	2,557
N2 [18]	Cheia	8,182	3,895	2,101	5,805	3,409	1,703
N2a [18]	Cheia	10,401	3,841	2,708	5,578	3,295	1,693
N3 [18]	Cheia	9,752	3,605	2,705	5,808	3,428	1,694

Quadro IV (cont.) - Índices de Ductilidade Experimentais e Teóricos

Viga	Tipo de secção	θ_u^{exp} (°/m)	θ_y^{exp} (°/m)	μ_θ^{exp}	θ_u^{teo} (°/m)	θ_y^{teo} (°/m)	μ_θ^{teo}
N4 [18]	Cheia	9,327	4,122	2,263	5,129	2,940	1,744
VB2 [26]	Cheia	4,184	3,417	1,225	3,850	2,367	1,627
VB3 [26]	Cheia	4,496	3,202	1,404	4,710	2,774	1,698
VB4 [26]	Cheia	4,239	2,932	1,446	5,293	2,929	1,807
VM1 [26]	Cheia	5,550	4,053	1,369	8,381	3,363	2,492
VM2 [26]	Cheia	3,426	2,177	1,573	5,026	2,311	2,175
VM3 [26]	Cheia	3,665	1,816	2,018	3,911	1,707	2,291
VQ1 [26]	Cheia	3,237	2,682	1,207	3,776	2,687	1,406
VQ3 [26]	Cheia	2,980	2,516	1,185	4,231	2,893	1,462
VQ9 [26]	Cheia	4,592	3,820	1,202	5,312	3,565	1,490
VS2-VQ2 [26]	Cheia	2,697	1,769	1,524	4,121	2,329	1,770
VS3 [26]	Cheia	3,974	3,696	1,075	3,586	2,416	1,484
VS4-VQ5 [26]	Cheia	3,990	3,459	1,153	3,284	2,114	1,554
VS9 [28]	Cheia	3,739	2,969	1,259	3,769	2,663	1,415
VS10-VB1 [28]	Cheia	3,858	3,372	1,144	3,291	2,123	1,551
VU1 [28]	Cheia	3,989	2,510	1,589	3,420	2,283	1,498
VU2 [28]	Cheia	4,009	3,512	1,141	3,401	2,239	1,519
VU3 [28]	Cheia	4,128	3,541	1,166	3,393	2,248	1,509
VU4 [28]	Cheia	3,398	2,574	1,320	3,475	2,151	1,616
A2 [27]	Cheia	4,171	2,124	1,964	5,871	2,112	2,779
A3 [27]	Cheia	7,489	2,364	3,167	4,991	2,751	1,814
A4 [27]	Cheia	4,343	2,984	1,456	4,501	2,415	1,864
B3 [27]	Cheia	7,318	3,609	2,028	5,399	3,013	1,792
B4 [27]	Cheia	6,537	3,503	1,866	4,890	2,591	1,887
B5UR1 [24]	Cheia	3,745	1,327	2,823	5,966	2,647	2,254
B7UR1 [24]	Cheia	2,941	0,581	5,061	7,492	2,416	3,101
B9UR1 [24]	Cheia	3,008	1,875	1,605	8,422	2,384	3,533
B12UR1 [24]	Cheia	1,799	0,517	3,478	8,391	2,348	3,574
B12UR2 [24]	Cheia	2,067	0,314	6,581	8,028	2,328	3,448
B12UR3 [2]	Cheia	3,306	1,053	3,138	7,405	2,520	2,939
B12UR4 [24]	Cheia	3,058	1,087	2,814	7,119	2,638	2,698
B12UR5 [24]	Cheia	3,850	1,537	2,505	6,530	2,644	2,470
B14UR1 [24]	Cheia	2,994	0,042	70,448	9,125	2,289	3,987
H-06-12 [15]	Cheia	4,905	1,112	4,413	4,444	1,388	3,203
H-07-10 [15]	Cheia	3,932	1,534	2,562	4,194	1,439	2,914
H-07-16 [15]	Cheia	3,183	1,292	2,463	3,667	1,342	2,733
H-12-12 [15]	Cheia	4,430	1,304	3,396	4,013	1,679	2,390
H-12-16 [15]	Cheia	3,992	1,675	2,383	3,617	1,824	1,983
H-14-10 [15]	Cheia	4,900	1,291	3,796	3,913	1,650	2,371

Quadro IV (cont.) - Índices de Ductilidade Experimentais e Teóricos

Viga	Tipo de secção	θ_u^{exp} (°/m)	θ_y^{exp} (°/m)	μ_{θ}^{exp}	θ_u^{teo} (°/m)	θ_y^{teo} (°/m)	μ_{θ}^{teo}
H-20-20 [15]	Cheia	3,720	2,129	1,747	3,320	1,771	1,874
N-06-06 [15]	Cheia	5,952	2,090	2,848	3,561	1,738	2,048
N-06-12 [15]	Cheia	4,876	1,670	2,920	3,085	1,584	1,948
N-07-10 [15]	Cheia	5,357	2,072	2,586	3,098	1,626	1,905
N-07-16 [15]	Cheia	4,790	2,760	1,736	2,772	1,583	1,751
N-12-12 [15]	Cheia	6,514	2,094	3,111	2,878	1,618	1,779
N-12-16 [15]	Cheia	5,084	1,828	2,781	2,670	1,490	1,791
N-14-10 [15]	Cheia	5,947	2,615	2,275	2,837	1,601	1,772
N-20-20 [15]	Cheia	3,624	1,434	2,526	2,512	1,364	1,841
NBS-43-44 [13]	Cheia	4,166	0,907	4,594	4,857	1,454	3,340
NBS-82-13 [13]	Cheia	1,084	0,362	2,998	3,679	1,395	2,637
SW4-1 [29]	Cheia	6,595	3,014	2,188	6,430	3,067	2,097
D3 [18]	Vazada	3,438	2,223	1,547	3,571	2,019	1,768
D4 [18]	Vazada	3,267	2,273	1,437	3,380	1,914	1,766
T0 [25]	Vazada	1,300	0,701	1,854	2,892	1,026	2,819
T1 [25]	Vazada	2,316	1,535	1,509	3,128	1,220	2,564
T2 [25]	Vazada	4,000	1,711	2,338	3,135	1,221	2,568
T5 [25]	Vazada	4,500	1,855	2,425	3,193	2,436	1,311
VH1 [26]	Vazada	2,865	2,361	1,213	3,478	2,459	1,415
VH2 [26]	Vazada	3,667	1,887	1,943	2,912	1,877	1,552
A1 [7]	Vazada	2,688	0,780	3,446	5,296	1,441	3,676
A2 [7]	Vazada	3,736	1,686	2,216	3,333	1,675	1,990
A3 [7]	Vazada	2,139	1,460	1,465	2,791	1,664	1,677
A4 [7]	Vazada	2,424	1,579	1,535	2,791	1,537	1,815
A5 [7]	Vazada	2,202	1,516	1,452	2,442	1,377	1,773
B2 [7]	Vazada	2,894	1,676	1,727	3,927	1,609	2,440
B3 [7]	Vazada	1,976	1,418	1,394	3,098	1,762	1,758
B4 [7]	Vazada	1,655	1,253	1,321	2,790	1,666	1,675
B5 [7]	Vazada	1,561	1,148	1,359	2,572	1,483	1,734
C1 [7]	Vazada	2,025	1,127	1,797	7,277	1,430	5,088
C2 [7]	Vazada	2,177	1,408	1,546	4,690	1,582	2,965
C3 [7]	Vazada	1,632	1,371	1,190	3,316	1,914	1,732
C4 [7]	Vazada	1,773	1,467	1,209	2,964	1,879	1,578
C5 [7]	Vazada	1,627	1,351	1,204	2,821	1,791	1,575
C6 [7]	Vazada	1,467	1,128	1,301	2,573	1,505	1,709
A095c [23]	Vazada	3,151	0,950	3,316	2,921	0,890	3,282
A120a [23]	Vazada	3,094	1,222	2,533	2,349	0,975	2,409
B065b [23]	Vazada	1,159	0,748	1,549	2,195	0,880	2,495
B080a [23]	Vazada	2,720	1,178	2,309	2,761	1,085	2,544

Quadro IV (cont.) - Índices de Ductilidade Experimentais e Teóricos

Viga	Tipo de secção	θ_u^{exp} (°/m)	θ_y^{exp} (°/m)	μ_θ^{exp}	θ_u^{teo} (°/m)	θ_y^{teo} (°/m)	μ_θ^{teo}
B110a [23]	Vazada	2,865	1,077	2,661	3,483	0,878	3,967
C065a [23]	Vazada	0,862	0,131	6,586	4,629	0,761	6,080
C100a [23]	Vazada	2,226	0,964	2,309	3,788	1,163	3,257
D075a [23]	Vazada	2,306	1,011	2,281	3,848	0,957	4,023
D090a [23]	Vazada	2,063	0,734	2,809	3,965	1,108	3,579

Anexo V. Verificação das Limitações Regulamentares

Quadro V.1 - Características para a verificação das vigas de referência
(ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	x (in)	$y = b_w$ (in)	$t = h$ (in)	x_1 (in)	y_1 (in)	A_t (in ²)	s (in)	f'_c (psi)	f_{ty} (psi)	f_{ly} (psi)
B3 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	5,00	4070	47500	47500
B4 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	3,63	4230	46400	46400
B5 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	2,75	4430	48200	48200
B6 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	2,25	4180	48100	48100
B7 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	5,00	3770	46400	46400
B8 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	2,25	3880	46700	46700
B9 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,11	6,00	4180	46300	46300
C4 [18]	Cheia	10,0	10,0	-	8,5	8,5	0,20	3,88	3940	48800	48800
C5 [18]	Cheia	10,0	10,0	-	8,5	8,5	0,20	2,88	3950	47600	47600
C6 [18]	Cheia	10,0	10,0	-	8,5	8,5	0,20	2,13	4000	45800	45800
G3 [18]	Cheia	10,0	20,0	-	8,5	18,5	0,20	6,13	3890	49100	49100
G4 [18]	Cheia	10,0	20,0	-	8,5	18,5	0,20	4,50	4100	47200	47200
G5 [18]	Cheia	10,0	20,0	-	8,5	18,5	0,20	3,38	3900	48000	48000
G7 [18]	Cheia	10,0	20,0	-	8,5	18,5	0,20	5,75	4490	46300	46300
G8 [18]	Cheia	10,0	20,0	-	8,5	18,5	0,20	4,13	4110	46700	46700
I3 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	5,00	6490	49800	49800
I4 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	3,63	6520	45700	45700
I5 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	2,75	6530	45000	45000
I6 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	2,25	6640	47200	47200
J1 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,11	6,00	2080	47500	47500
J2 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,11	3,88	2110	46400	46400
J3 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	5,00	2450	56350	56350
J4 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	3,63	2430	47000	47000
K2 [18]	Cheia	6,0	19,5	-	4,5	18,0	0,11	4,13	4440	48700	48700
K3 [18]	Cheia	6,0	19,5	-	4,5	18,0	0,20	4,88	4210	45800	45800
K4 [18]	Cheia	6,0	19,5	-	4,5	18,0	0,20	3,38	4150	49900	49900
M1 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,11	5,88	4330	47300	47300
M2 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,11	4,13	4430	47700	47700
M3 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	5,50	3880	46700	46700
M4 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	4,13	3850	46200	46200
M5 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	3,25	4060	48600	48600
M6 [18]	Cheia	10,0	15,0	-	8,5	13,5	0,20	3,25	4260	46100	46100
N1 [18]	Cheia	6,0	12,0	-	5,1	11,1	0,05	3,63	4280	51100	51100
N1a [18]	Cheia	6,0	12,0	-	5,1	11,1	0,05	3,63	4160	50200	50200
N2 [18]	Cheia	6,0	12,0	-	5,1	11,1	0,05	2,00	4410	48000	48000
N2a [18]	Cheia	6,0	12,0	-	5,1	11,1	0,11	4,50	4120	48300	48300

Quadro V.1 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	x (in)	$y = b_w$ (in)	$t = h$ (in)	x_1 (in)	y_1 (in)	A_t (in ²)	s (in)	f'_c (psi)	f_{ty} (psi)	f_{ly} (psi)
N3 [18]	Cheia	6,0	12,0	-	5,1	11,1	0,05	2,50	3960	51000	51000
N4 [18]	Cheia	6,0	12,0	-	5,1	11,1	0,11	3,50	3960	49433	49433
VB2 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,05	1,97	3828	78510	78510
VB3 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,05	1,97	5670	78510	78510
VB4 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,05	1,97	7221	78510	78510
VM1 [26]	Cheia	11,6	6,3	-	11,0	5,7	0,02	1,38	5670	64145	64145
VM2 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,04	2,09	5235	62580	62580
VM3 [26]	Cheia	23,1	12,6	-	22,1	11,6	0,08	2,76	5800	66847	66847
VQ1 [26]	Cheia	12,8	12,8	-	12,0	12,0	0,04	3,94	2755	80785	80785
VQ3 [26]	Cheia	22,8	7,3	-	22,0	6,5	0,05	3,94	2552	62722	62722
VQ9 [26]	Cheia	31,7	5,5	-	30,9	4,7	0,04	3,94	2828	64002	64002
VS2-VQ2 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,05	3,94	2755	62722	62722
VS3 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,05	2,64	2828	62722	62722
VS4-VQ5 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,05	1,97	2755	62722	62722
VS9 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,04	3,94	2552	82777	82777
VS10-VB1 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,04	1,97	2755	82777	82777
VU1 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,04	1,97	2828	64002	64002
VU2 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,04	1,97	2828	64002	64002
VU3 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,04	2,64	2683	64002	64002
VU4 [26]	Cheia	17,3	9,4	-	16,5	8,7	0,04	3,94	2683	64002	64002
A2 [27]	Cheia	10,0	10,0	-	8,7	8,7	0,05	1,63	5539	55100	55100
A3 [27]	Cheia	10,0	10,0	-	8,6	8,6	0,11	3,13	5710	51100	51100
A4 [27]	Cheia	10,0	10,0	-	8,6	8,6	0,11	2,25	5680	50895	50895
B3 [27]	Cheia	7,0	14,0	-	5,6	12,6	0,11	3,25	5600	51100	51100
B4 [27]	Cheia	7,0	14,0	-	5,6	12,6	0,11	2,38	5580	50900	50900
B5UR1 [24]	Cheia	8,0	12,0	-	6,5	10,5	0,11	4,25	5742	55970	55970
B7UR1 [24]	Cheia	8,0	12,0	-	6,5	10,5	0,11	4,25	9367	55970	55970
B9UR1 [24]	Cheia	8,0	12,0	-	6,5	10,5	0,11	4,25	10875	55970	55970
B12UR1 [24]	Cheia	8,0	12,0	-	6,5	10,5	0,11	4,25	11687	55970	55970
B12UR2 [24]	Cheia	8,0	12,0	-	6,5	10,5	0,11	4,02	11049	55970	55970
B12UR3 [24]	Cheia	8,0	12,0	-	6,5	10,5	0,11	3,74	10571	55028	55028
B12UR4 [24]	Cheia	8,0	12,0	-	6,5	10,5	0,11	3,54	11006	54085	54085
B12UR5 [24]	Cheia	8,0	12,0	-	6,5	10,5	0,11	2,76	11122	55100	55100
B14UR1 [24]	Cheia	8,0	12,0	-	6,5	10,5	0,11	4,25	13616	55970	55970
H-06-12 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	3,94	11383	59450	59450
H-07-10 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	3,54	9918	72500	72500
H-07-16 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	3,54	9918	72500	72500
H-12-12 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	1,97	11383	59450	59450
H-12-16 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	1,97	11383	75400	75400

Quadro V.1 (cont.) - Características para a verificação das vigas das Vigas de Referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de seção	x (in)	$y = b_w$ (in)	$t = h$ (in)	x_1 (in)	y_1 (in)	A_t (in ²)	s (in)	f'_c (psi)	f_{ty} (psi)	f_{ly} (psi)
H-14-10 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,20	3,15	9918	72500	72500
H-20-20 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,20	2,17	11383	81200	81200
N-06-06 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	3,94	5148	63800	63800
N-06-12 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	3,94	5148	59450	59450
N-07-10 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	3,54	4858	72500	72500
N-07-16 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	3,54	4858	72500	72500
N-12-12 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	1,97	5148	59450	59450
N-12-16 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,11	1,97	5148	75400	75400
N-14-10 [15]	Cheia	13,8	19,7	-	11,8	17,7	0,20	3,15	4858	72500	72500
N-20-20 [15]	Cheia	13,78	19,69	-	11,81	17,72	0,20	2,17	5148	81200	81200
NBS-43-44 [13]	Cheia	13,78	19,69	-	11,81	17,72	0,11	5,51	5075	58000	58000
NBS-82-13 [13]	Cheia	13,78	19,69	-	11,81	17,72	0,05	7,48	5075	71485	71485
SW4-1 [29]	Cheia	5,91	17,72	-	3,94	15,75	0,12	7,87	6409	66555	66555
D3 [18]	Vazada	10,00	15,00	8,50	13,50	2,50	0,12	5,00	4120	49500	49500
D4 [18]	Vazada	10,00	15,00	8,50	13,50	2,50	0,20	3,63	4440	47900	47900
T0 [25]	Vazada	19,69	19,69	16,93	16,93	3,15	0,14	4,33	6541	50053	50053
T1 [25]	Vazada	19,69	19,69	17,87	17,87	3,15	0,18	4,33	5116	51724	51724
T2 [25]	Vazada	19,69	19,69	16,93	16,93	3,15	0,14	4,33	5119	51759	51759
T5 [25]	Vazada	31,50	15,75	28,74	12,99	3,15	0,14	4,33	6825	76644	76644
VH1 [26]	Vazada	12,76	12,76	11,97	11,97	3,15	0,04	3,94	2489	64856	64856
VH2 [26]	Vazada	12,76	12,76	11,97	11,97	3,15	0,18	1,97	2489	64856	64856
A1 [7]	Vazada	23,62	23,62	21,12	21,52	3,86	0,04	3,54	7022	92316	100906
A2 [7]	Vazada	23,62	23,62	21,18	20,91	4,20	0,08	3,15	6864	100906	97501
A3 [7]	Vazada	23,62	23,62	21,26	21,06	4,29	0,12	3,74	6692	103650	97501
A4 [7]	Vazada	23,62	23,62	20,47	20,67	4,11	0,12	2,76	7943	103650	104964
A5 [7]	Vazada	23,62	23,62	20,79	20,79	4,10	0,18	3,15	7700	97501	104964
B2 [7]	Vazada	23,62	23,62	20,96	21,02	4,25	0,08	2,95	10118	100906	97501
B3 [7]	Vazada	23,62	23,62	21,06	21,14	4,29	0,12	2,76	11284	103650	104964
B4 [7]	Vazada	23,62	23,62	20,57	21,08	4,42	0,18	2,95	11571	97501	104964
B5 [7]	Vazada	23,62	23,62	20,39	20,39	4,59	0,18	2,36	11077	97501	104964
C1 [7]	Vazada	23,62	23,62	21,26	21,61	3,81	0,04	3,54	13302	92316	100906
C2 [7]	Vazada	23,62	23,62	20,94	20,98	3,95	0,08	3,15	13747	100906	97501
C3 [7]	Vazada	23,62	23,62	21,46	21,26	4,04	0,12	2,95	13278	103650	104964
C4 [7]	Vazada	23,62	23,62	21,50	21,46	4,05	0,18	3,15	13250	97501	104964
C5 [7]	Vazada	23,62	23,62	21,26	21,38	4,09	0,18	2,56	14019	97501	104964
C6 [7]	Vazada	23,62	23,62	20,98	20,83	4,09	0,18	1,97	12685	104964	104964
A095c [23]	Vazada	19,57	27,99	17,20	25,63	5,71	0,12	5,12	5090	53795	53795
A120a [23]	Vazada	19,76	28,31	17,40	25,94	7,24	0,07	6,69	4002	67280	67280
B065b [23]	Vazada	19,80	27,95	17,44	25,59	3,62	0,12	5,12	5684	65540	65540

Quadro V.1 (cont.) - Características para a verificação das vigas das Vigas de Referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	x (in)	$y = b_w$ (in)	$t = h$ (in)	x_1 (in)	y_1 (in)	A_t (in ²)	s (in)	f'_c (psi)	f_{ty} (psi)	f_{ly} (psi)
B080a [23]	Vazada	19,69	28,39	4,41	19,69	28,39	0,20	3,94	6743	65830	65830
B110a [23]	Vazada	19,61	27,95	6,10	19,61	27,95	0,09	5,91	6975	65685	65685
C065a [23]	Vazada	19,49	30,75	3,35	19,49	30,75	0,12	5,12	11426	49010	49010
C100a [23]	Vazada	19,65	28,46	5,00	19,65	28,46	0,20	3,94	13137	67570	67570
D075a [23]	Vazada	19,61	28,90	3,43	19,61	28,90	0,20	3,94	13761	68005	68005
D090a [23]	Vazada	19,72	28,43	4,13	19,72	28,43	0,20	3,94	15327	67570	67570

Quadro V.2 - Verificação dos limites mínimos e máximos impostos para as armaduras de torção das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	$A_{t,min}/s$		$A_{t,max}/s$		$A_{t,ef}/s$ (cm^2/m)	$A_{l,min}$		$A_{l,ef}$ (cm^2)
		(in^2/in)	(cm^2/m)	(in^2/in)	(cm^2/m)		(in^2)	(cm^2)	
B3 [18]	Cheia	0,0053	1,33	0,0474	12,03	10,16	0,09	0,60	11,36
B4 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0495	12,55	14,01	-0,53	<0	15,48
B5 [18]	Cheia	0,0052	1,31	0,0488	12,37	18,47	-1,37	<0	20,39
B6 [18]	Cheia	0,0052	1,32	0,0475	12,04	22,57	-2,08	<0	25,81
B7 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0467	11,85	10,16	0,14	0,88	5,16
B8 [18]	Cheia	0,0054	1,36	0,0471	11,94	22,57	-2,03	<0	5,16
B9 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0493	12,50	4,66	1,09	7,06	11,36
C4 [18]	Cheia	0,0051	1,30	0,0575	14,59	13,11	-0,36	<0	11,36
C5 [18]	Cheia	0,0053	1,33	0,0591	14,97	17,66	-0,94	<0	15,48
C6 [18]	Cheia	0,0055	1,38	0,0618	15,66	23,90	-1,71	<0	20,39
G3 [18]	Cheia	0,0051	1,29	0,0375	9,51	8,29	0,44	2,82	11,36
G4 [18]	Cheia	0,0053	1,34	0,0401	10,16	11,29	-0,11	<0	15,48
G5 [18]	Cheia	0,0052	1,32	0,0384	9,74	15,05	-0,95	<0	20,39
G7 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0427	10,83	8,83	0,45	2,93	12,00
G8 [18]	Cheia	0,0054	1,36	0,0405	10,28	12,31	-0,30	<0	17,03
I3 [18]	Cheia	0,0050	1,27	0,0571	14,49	10,16	0,01	0,05	11,36
I4 [18]	Cheia	0,0055	1,39	0,0624	15,82	14,01	-0,50	<0	15,48
I5 [18]	Cheia	0,0056	1,41	0,0634	16,08	18,47	-1,24	<0	20,39
I6 [18]	Cheia	0,0053	1,34	0,0610	15,46	22,57	-2,05	<0	25,81
J1 [18]	Cheia	0,0053	1,33	0,0339	8,60	4,66	1,05	6,75	5,16
J2 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0350	8,87	7,21	0,65	4,17	8,00
J3 [18]	Cheia	0,0044	1,12	0,0310	7,87	10,16	-0,20	<0	11,36
J4 [18]	Cheia	0,0053	1,35	0,0371	9,39	14,01	-0,55	<0	15,48
K2 [18]	Cheia	0,0031	0,78	0,0253	6,41	6,78	-0,09	<0	7,74
K3 [18]	Cheia	0,0033	0,83	0,0262	6,64	10,42	-0,67	<0	12,00
K4 [18]	Cheia	0,0030	0,76	0,0239	6,05	15,05	-1,58	<0	17,03
M1 [18]	Cheia	0,0053	1,34	0,0491	12,46	4,76	1,04	6,69	8,00
M2 [18]	Cheia	0,0052	1,33	0,0493	12,50	6,78	0,67	4,33	11,36
M3 [18]	Cheia	0,0054	1,36	0,0471	11,94	9,23	0,28	1,84	15,48
M4 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0474	12,03	12,31	-0,23	<0	20,39
M5 [18]	Cheia	0,0051	1,30	0,0463	11,74	15,63	-0,90	<0	25,81
M6 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0500	12,68	15,63	-0,80	<0	30,58
N1 [18]	Cheia	0,0029	0,74	0,0225	5,71	3,51	0,31	2,03	2,84
N1a [18]	Cheia	0,0030	0,76	0,0226	5,73	3,51	0,33	2,12	2,84
N2 [18]	Cheia	0,0031	0,79	0,0243	6,17	6,36	0,00	<0	5,16
N2a [18]	Cheia	0,0031	0,79	0,0234	5,93	6,21	0,01	0,08	1,61
N3 [18]	Cheia	0,0029	0,75	0,0217	5,50	5,09	0,11	0,74	4,26
N4 [18]	Cheia	0,0030	0,77	0,0224	5,68	7,99	-0,23	<0	6,58

Quadro V.2 (cont.) - Verificação dos limites mínimos e máximos impostos para as armaduras de torção das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	$A_{t,min}/s$		$A_{t,max}/s$		$A_{t,ef}/s$	$A_{l,min}$		$A_{l,ef}$
		(in ² /in)	(cm ² /m)	(in ² /in)	(cm ² /m)		(in ²)	(cm ²)	
VB2 [26]	Cheia	0,0055	1,40	0,0599	15,20	5,84	1,07	6,87	7,01
VB3 [26]	Cheia	0,0055	1,40	0,0730	18,49	5,84	1,07	6,87	7,01
VB4 [26]	Cheia	0,0055	1,40	0,0823	20,87	5,84	1,07	6,87	7,01
VM1 [26]	Cheia	0,0045	1,14	0,0601	15,24	3,63	0,73	4,72	3,00
VM2 [26]	Cheia	0,0069	1,75	0,0879	22,29	5,32	1,73	11,19	6,60
VM3 [26]	Cheia	0,0086	2,19	0,1152	29,20	7,14	2,76	17,82	12,84
VQ1 [26]	Cheia	0,0039	1,00	0,0304	7,71	2,88	0,97	6,25	3,46
VQ3 [26]	Cheia	0,0091	2,31	0,0901	22,85	3,05	3,48	22,42	4,27
VQ9 [26]	Cheia	0,0124	3,14	0,1421	36,02	2,82	6,28	40,53	5,08
VS2-VQ2 [26]	Cheia	0,0069	1,75	0,0637	16,14	3,05	2,18	14,05	3,66
VS3 [26]	Cheia	0,0069	1,75	0,0645	16,35	4,55	1,88	12,13	5,49
VS4-VQ5 [26]	Cheia	0,0069	1,75	0,0637	16,14	6,10	1,57	10,15	7,32
VS9 [26]	Cheia	0,0052	1,33	0,0464	11,77	2,90	1,53	9,90	3,48
VS10-VB1 [26]	Cheia	0,0052	1,33	0,0482	12,23	5,80	0,96	6,18	6,96
VU1 [26]	Cheia	0,0068	1,72	0,0632	16,02	5,60	1,62	10,43	3,36
VU2 [26]	Cheia	0,0068	1,72	0,0632	16,02	5,60	1,62	10,43	5,04
VU3 [26]	Cheia	0,0068	1,72	0,0616	15,60	4,18	1,90	12,25	6,72
VU4 [26]	Cheia	0,0068	1,72	0,0616	15,60	2,80	2,17	14,02	6,72
A2 [27]	Cheia	0,0045	1,15	0,0572	14,49	7,82	0,19	1,24	5,16
A3 [27]	Cheia	0,0049	1,24	0,0642	16,27	8,94	0,14	0,87	8,00
A4 [27]	Cheia	0,0049	1,25	0,0643	16,29	12,42	-0,33	<0	11,36
B3 [27]	Cheia	0,0034	0,87	0,0323	8,18	8,60	-0,24	<0	8,00
B4 [27]	Cheia	0,0034	0,87	0,0324	8,20	11,77	-0,69	<0	11,36
B5UR1 [24]	Cheia	0,0036	0,90	0,0408	10,33	6,56	0,09	0,60	5,16
B7UR1 [24]	Cheia	0,0036	0,90	0,0521	13,20	6,56	0,09	0,60	5,16
B9UR1 [24]	Cheia	0,0036	0,90	0,0561	14,22	6,56	0,09	0,60	5,16
B12UR1 [24]	Cheia	0,0036	0,90	0,0581	14,74	6,56	0,09	0,60	5,16
B12UR2 [24]	Cheia	0,0036	0,90	0,0565	14,33	6,95	0,04	0,26	5,16
B12UR3 [24]	Cheia	0,0036	0,92	0,0562	14,26	7,46	-0,01	<0	6,58
B12UR4 [24]	Cheia	0,0037	0,94	0,0584	14,80	7,88	-0,05	<0	7,74
B12UR5 [24]	Cheia	0,0036	0,92	0,0576	14,61	10,13	-0,37	<0	8,00
B14UR1 [24]	Cheia	0,0036	0,90	0,0628	15,91	6,56	0,09	0,60	5,16
H-06-12 [15]	Cheia	0,0058	1,47	0,0888	22,51	7,10	1,09	7,01	20,65
H-07-10 [15]	Cheia	0,0048	1,20	0,0680	17,23	7,89	0,41	2,65	17,03
H-07-16 [15]	Cheia	0,0048	1,20	0,0680	17,23	7,89	0,41	2,65	28,39
H-12-12 [15]	Cheia	0,0058	1,47	0,0888	22,51	14,20	-0,56	<0	20,65
H-12-16 [15]	Cheia	0,0046	1,16	0,0700	17,75	14,20	-1,14	<0	28,39
H-14-10 [15]	Cheia	0,0048	1,20	0,0680	17,23	16,13	-1,50	<0	17,03

Quadro V.2 (cont.) - Verificação dos limites mínimos e máximos impostos para as armaduras de torção das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	$A_{t,min}/s$		$A_{t,max}/s$		$A_{t,ef}/s$	$A_{l,min}$		$A_{l,ef}$
		(in ² /in)	(cm ² /m)	(in ² /in)	(cm ² /m)		(in ²)	(cm ²)	
H-20-20 [15]	Cheia	0,0042	1,08	0,0650	16,48	23,45	-3,45	<0	34,06
N-06-06 [15]	Cheia	0,0054	1,37	0,0557	14,11	7,10	0,90	5,81	12,00
N-06-12 [15]	Cheia	0,0058	1,47	0,0597	15,14	7,10	1,09	7,01	20,65
N-07-10 [15]	Cheia	0,0048	1,20	0,0476	12,06	7,89	0,41	2,65	17,03
N-07-16 [15]	Cheia	0,0048	1,20	0,0476	12,06	7,89	0,41	2,65	28,39
N-12-12 [15]	Cheia	0,0058	1,47	0,0597	15,14	14,20	-0,56	<0	20,65
N-12-16 [15]	Cheia	0,0046	1,16	0,0471	11,94	14,20	-1,14	<0	28,39
N-14-10 [15]	Cheia	0,0048	1,20	0,0476	12,06	16,13	-1,50	<0	17,03
N-20-20 [15]	Cheia	0,0042	1,08	0,0437	11,08	23,45	-3,45	<0	34,06
NBS-43-44 [13]	Cheia	0,0059	1,51	0,0608	15,41	5,09	1,62	10,46	7,60
NBS-82-13 [13]	Cheia	0,0048	1,22	0,0493	12,50	1,67	1,89	12,19	14,25
SW4-1 [29]	Cheia	0,0022	0,56	0,0256	6,48	3,93	0,09	0,58	7,85
D3 [18]	Vazada	0,0051	1,28	0,0458	11,61	6,30	0,69	4,43	11,36
D4 [18]	Vazada	0,0052	1,32	0,0491	12,46	14,01	-0,59	<0	15,48
T0 [25]	Vazada	0,0098	2,49	0,0890	22,55	8,50	1,14	7,38	32,16
T1 [25]	Vazada	0,0095	2,41	0,0683	17,31	10,28	0,59	3,80	18,10
T2 [25]	Vazada	0,0095	2,41	0,0761	19,29	8,50	1,03	6,65	18,10
T5 [25]	Vazada	0,0103	2,60	0,0713	18,08	8,50	-0,05	<0	10,00
VH1 [26]	Vazada	0,0049	1,25	0,0356	9,02	2,88	1,32	8,50	3,46
VH2 [26]	Vazada	0,0049	1,25	0,0356	9,02	23,04	-2,48	<0	6,91
A1 [7]	Vazada	0,0064	1,62	0,0553	14,02	3,11	1,57	10,11	6,53
A2 [7]	Vazada	0,0059	1,48	0,0564	14,31	6,25	0,83	5,36	13,95
A3 [7]	Vazada	0,0057	1,44	0,0547	13,87	8,32	0,21	1,35	18,10
A4 [7]	Vazada	0,0057	1,44	0,0600	15,21	11,29	-1,08	<0	23,75
A5 [7]	Vazada	0,0061	1,54	0,0616	15,61	14,13	-2,03	<0	30,66
B2 [7]	Vazada	0,0059	1,48	0,0693	17,57	6,67	0,73	4,68	14,58
B3 [7]	Vazada	0,0057	1,44	0,0712	18,04	11,29	-0,99	<0	23,75
B4 [7]	Vazada	0,0061	1,54	0,0805	20,40	15,07	-2,13	<0	32,17
B5 [7]	Vazada	0,0061	1,54	0,0860	21,81	18,83	-3,19	<0	40,21
C1 [7]	Vazada	0,0064	1,62	0,0744	18,86	3,11	1,54	9,96	6,53
C2 [7]	Vazada	0,0059	1,48	0,0753	19,10	6,25	0,66	4,23	13,95
C3 [7]	Vazada	0,0057	1,44	0,0712	18,04	10,53	-0,92	<0	23,75
C4 [7]	Vazada	0,0061	1,54	0,0749	18,98	14,13	-2,12	<0	30,66
C5 [7]	Vazada	0,0061	1,54	0,0786	19,93	17,38	-3,18	<0	36,69
C6 [7]	Vazada	0,0056	1,43	0,0726	18,40	22,60	-4,84	<0	48,25
A095c [23]	Vazada	0,0091	2,31	0,0896	22,70	5,88	4,25	27,42	13,16
A120a [23]	Vazada	0,0073	1,86	0,0640	16,21	2,63	4,20	27,08	20,00
B065b [23]	Vazada	0,0076	1,91	0,0578	14,65	5,88	1,81	11,70	50,97

Quadro V.2 (cont.) - Verificação dos limites mínimos e máximos impostos para as armaduras de torção das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	$A_{t,min}/s$		$A_{t,max}/s$		$A_{t,ef}/s$	$A_{l,min}$		$A_{l,ef}$
		(in^2/in)	(cm^2/m)	(in^2/in)	(cm^2/m)		(in^2)	(cm^2)	
B080a [23]	Vazada	0,0075	1,90	0,0755	19,14	12,90	0,24	1,57	28,39
B110a [23]	Vazada	0,0075	1,89	0,0862	21,84	3,82	3,83	24,68	20,00
C065a [23]	Vazada	0,0099	2,52	0,0954	24,19	5,88	2,87	18,49	20,00
C100a [23]	Vazada	0,0073	1,84	0,1141	28,93	12,90	0,64	4,12	28,39
D075a [23]	Vazada	0,0072	1,83	0,0802	20,33	12,90	-0,92	<0	28,39
D090a [23]	Vazada	0,0073	1,85	0,1040	26,35	12,90	-0,16	<0	28,39

Quadro V.3 - Verificação das disposições construtivas para as armaduras de torção das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	$s_{t,máx}$		$s_{t,ef}$ (cm)	$s_{l,máx}$ (cm)	$s_{l,ef}$ (cm)	$\phi_{l,min}$ (mm)	$\phi_{l,ef,canto}$ (mm)	$f_{y,máx}$ (MPa)	$f_{y,ef}$ (MPa)
		(in)	(cm)							
B3 [18]	Cheia	5,50	13,97	12,70	30,48	33,02	10,00	19,05	413,8	327,6
B4 [18]	Cheia	5,50	13,97	9,21	30,48	32,60	10,00	22,20	413,8	320,0
B5 [18]	Cheia	5,50	13,97	6,99	30,48	32,17	10,00	25,40	413,8	332,4
B6 [18]	Cheia	5,50	13,97	5,72	30,48	31,76	10,00	28,50	413,8	331,7
B7 [18]	Cheia	5,50	13,97	12,70	30,48	33,87	10,00	12,70	413,8	320,0
B8 [18]	Cheia	5,50	13,97	5,72	30,48	33,87	10,00	12,70	413,8	322,1
B9 [18]	Cheia	5,50	13,97	15,24	30,48	33,45	10,00	19,05	413,8	319,3
C4 [18]	Cheia	4,25	10,80	9,84	30,48	24,55	10,00	19,05	413,8	336,6
C5 [18]	Cheia	4,25	10,80	7,30	30,48	24,13	10,00	22,20	413,8	328,3
C6 [18]	Cheia	4,25	10,80	5,40	30,48	23,71	10,00	25,40	413,8	315,9
G3 [18]	Cheia	6,75	17,15	15,56	30,48	41,49	10,00	19,05	413,8	338,6
G4 [18]	Cheia	6,75	17,15	11,43	30,48	41,07	10,00	22,20	413,8	325,5
G5 [18]	Cheia	6,75	17,15	8,57	30,48	40,64	10,00	25,40	413,8	331,0
G7 [18]	Cheia	6,75	17,15	14,61	30,48	41,91	10,00	15,88	413,8	319,3
G8 [18]	Cheia	6,75	17,15	10,48	30,48	41,49	10,00	19,05	413,8	322,1
I3 [18]	Cheia	5,50	13,97	12,70	30,48	33,02	10,00	19,05	413,8	343,4
I4 [18]	Cheia	5,50	13,97	9,21	30,48	32,60	10,00	22,20	413,8	315,2
I5 [18]	Cheia	5,50	13,97	6,99	30,48	32,17	10,00	25,40	413,8	310,3
I6 [18]	Cheia	5,50	13,97	5,72	30,48	31,76	10,00	28,50	413,8	325,5
J1 [18]	Cheia	5,50	13,97	15,24	30,48	34,29	10,00	12,70	413,8	327,6
J2 [18]	Cheia	5,50	13,97	9,84	30,48	33,87	10,00	15,88	413,8	320,0
J3 [18]	Cheia	5,50	13,97	12,70	30,48	33,02	10,00	19,05	413,8	388,6
J4 [18]	Cheia	5,50	13,97	9,21	30,48	32,60	10,00	22,20	413,8	324,1
K2 [18]	Cheia	5,63	14,29	10,48	30,48	35,14	10,00	12,70	413,8	335,9
K3 [18]	Cheia	5,63	14,29	12,38	30,48	34,29	10,00	15,88	413,8	315,9
K4 [18]	Cheia	5,63	14,29	8,57	30,48	33,87	10,00	19,05	413,8	344,1
M1 [18]	Cheia	5,50	13,97	14,92	30,48	33,87	10,00	15,88	413,8	326,2
M2 [18]	Cheia	5,50	13,97	10,48	30,48	33,45	10,00	19,05	413,8	329,0
M3 [18]	Cheia	5,50	13,97	13,97	30,48	32,60	10,00	22,20	413,8	322,1
M4 [18]	Cheia	5,50	13,97	10,48	30,48	32,17	10,00	25,40	413,8	318,6
M5 [18]	Cheia	5,50	13,97	8,26	30,48	31,76	10,00	28,50	413,8	335,2
M6 [18]	Cheia	5,50	13,97	8,26	30,48	32,17	10,00	25,40	413,8	317,9
N1 [18]	Cheia	4,06	10,33	9,21	30,48	25,42	10,00	9,50	413,8	352,4
N1a [18]	Cheia	4,06	10,33	9,21	30,48	25,42	10,00	9,50	413,8	346,2
N2 [18]	Cheia	4,06	10,33	5,08	30,48	24,99	10,00	12,70	413,8	331,0
N2a [18]	Cheia	4,06	10,33	11,43	30,48	24,57	10,00	12,70	413,8	333,1
N3 [18]	Cheia	4,06	10,33	6,35	30,48	25,42	10,00	9,50	413,8	351,7
N4 [18]	Cheia	4,06	10,33	8,89	30,48	14,36	10,00	12,70	413,8	340,9

Quadro V.3 (cont.) - Verificação das disposições construtivas para as armaduras de torção das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	$s_{t,m\acute{a}x}$		$s_{t,ef}$ (cm)	$s_{l,m\acute{a}x}$ (cm)	$s_{l,ef}$ (cm)	$\phi_{l,min}$ (mm)	$\phi_{l,ef,canto}$ (mm)	$f_{y,m\acute{a}x}$ (MPa)	$f_{y,ef}$ (MPa)
		(in)	(cm)							
VB2 [26]	Cheia	6,30	16,00	5,00	30,48	4,83	10,00	6,00	413,8	541,4
VB3 [26]	Cheia	6,30	16,00	5,00	30,48	4,83	10,00	6,00	413,8	541,4
VB4 [26]	Cheia	6,30	16,00	5,00	30,48	4,83	10,00	6,00	413,8	541,4
VM1 [26]	Cheia	4,19	10,65	3,50	30,48	15,60	10,00	8,00	413,8	442,4
VM2 [26]	Cheia	6,30	16,00	5,30	30,48	23,68	10,00	12,00	413,8	431,6
VM3 [26]	Cheia	8,42	21,38	7,00	30,48	31,64	10,00	16,00	413,8	461,0
VQ1 [26]	Cheia	5,98	15,20	10,00	30,48	10,18	10,00	6,00	413,8	557,1
VQ3 [26]	Cheia	7,15	18,15	10,00	30,48	10,34	10,00	6,00	413,8	432,6
VQ9 [26]	Cheia	8,92	22,65	10,00	30,48	9,88	10,00	6,00	413,8	441,4
VS2-VQ2 [26]	Cheia	6,30	16,00	10,00	30,48	10,76	10,00	6,00	413,8	432,6
VS3 [26]	Cheia	6,30	16,00	6,70	30,48	6,75	10,00	6,00	413,8	432,6
VS4-VQ5 [26]	Cheia	6,30	16,00	5,00	30,48	4,83	10,00	6,00	413,8	432,6
VS9 [26]	Cheia	6,30	16,00	10,00	30,48	10,76	10,00	6,00	413,8	570,9
VS10-VB1 [26]	Cheia	6,30	16,00	5,00	30,48	4,83	10,00	6,00	413,8	570,9
VU1 [26]	Cheia	6,30	16,00	5,00	30,48	10,76	10,00	6,00	413,8	441,4
VU2 [26]	Cheia	6,30	16,00	5,00	30,48	6,75	10,00	6,00	413,8	441,4
VU3 [26]	Cheia	6,30	16,00	6,70	30,48	4,83	10,00	6,00	413,8	441,4
VU4 [26]	Cheia	6,30	16,00	10,00	30,48	4,83	10,00	6,00	413,8	441,4
A2 [27]	Cheia	4,37	11,10	4,13	30,48	27,06	10,00	12,70	413,8	380,0
A3 [27]	Cheia	4,31	10,96	7,94	30,48	25,84	10,00	15,88	413,8	352,4
A4 [27]	Cheia	4,31	10,96	5,72	30,48	25,42	10,00	19,05	413,8	351,0
B3 [27]	Cheia	4,56	11,60	8,26	30,48	27,54	10,00	15,88	413,8	352,4
B4 [27]	Cheia	4,56	11,60	6,03	30,48	27,11	10,00	19,05	413,8	351,0
B5UR1 [24]	Cheia	4,25	10,80	10,80	30,48	25,84	10,00	12,70	413,8	386,0
B7UR1 [24]	Cheia	4,25	10,80	10,80	30,48	25,84	10,00	12,70	413,8	386,0
B9UR1 [24]	Cheia	4,25	10,80	10,80	30,48	25,84	10,00	12,70	413,8	386,0
B12UR1 [24]	Cheia	4,25	10,80	10,80	30,48	25,84	10,00	12,70	413,8	386,0
B12UR2 [24]	Cheia	4,25	10,80	10,20	30,48	25,84	10,00	12,70	413,8	386,0
B12UR3 [24]	Cheia	4,25	10,80	9,50	30,48	15,12	10,00	12,70	413,8	379,5
B12UR4 [24]	Cheia	4,25	10,80	9,00	30,48	15,00	10,00	12,70	413,8	373,0
B12UR5 [24]	Cheia	4,25	10,80	7,00	30,48	25,42	10,00	15,88	413,8	380,0
B14UR1 [24]	Cheia	4,25	10,80	10,80	30,48	25,84	10,00	12,70	413,8	386,0
H-06-12 [15]	Cheia	7,38	18,75	10,00	30,48	8,39	10,00	12,70	413,8	410,0
H-07-10 [15]	Cheia	7,38	18,75	9,00	30,48	26,95	10,00	19,05	413,8	500,0
H-07-16 [15]	Cheia	7,38	18,75	9,00	30,48	14,13	10,00	19,05	413,8	500,0
H-12-12 [15]	Cheia	7,38	18,75	5,00	30,48	8,39	10,00	12,70	413,8	410,0
H-12-16 [15]	Cheia	7,38	18,75	5,00	30,48	14,13	10,00	19,05	413,8	520,0
H-14-10 [15]	Cheia	7,38	18,75	8,00	30,48	26,70	10,00	19,05	413,8	500,0

Quadro V.3 (cont.) - Verificação das disposições construtivas para as armaduras de torção das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	$s_{t,máx}$		$s_{t,ef}$ (cm)	$s_{l,máx}$ (cm)	$s_{l,ef}$ (cm)	$\phi_{l,min}$ (mm)	$\phi_{l,ef,canto}$ (mm)	$f_{y,máx}$ (MPa)	$f_{y,ef}$ (MPa)
		(in)	(cm)							
H-20-20 [15]	Cheia	7,38	18,75	5,50	30,48	11,10	10,00	19,05	413,8	560,0
N-06-06 [15]	Cheia	7,38	18,75	10,00	30,48	27,33	10,00	15,88	413,8	440,0
N-06-12 [15]	Cheia	7,38	18,75	10,00	30,48	8,39	10,00	12,70	413,8	410,0
N-07-10 [15]	Cheia	7,38	18,75	9,00	30,48	26,95	10,00	19,05	413,8	500,0
N-07-16 [15]	Cheia	7,38	18,75	9,00	30,48	14,13	10,00	19,05	413,8	500,0
N-12-12 [15]	Cheia	7,38	18,75	5,00	30,48	8,39	10,00	12,70	413,8	410,0
N-12-16 [15]	Cheia	7,38	18,75	5,00	30,48	14,13	10,00	19,05	413,8	520,0
N-14-10 [15]	Cheia	7,38	18,75	8,00	30,48	26,70	10,00	19,05	413,8	500,0
N-20-20 [15]	Cheia	7,38	18,75	5,50	30,48	11,10	10,00	19,05	413,8	560,0
NBS-43-44 [13]	Cheia	7,38	18,75	14,00	30,48	27,72	10,00	12,70	413,8	400,0
NBS-82-13 [13]	Cheia	7,38	18,75	19,00	30,48	19,43	10,00	9,53	413,8	493,0
SW4-1 [29]	Cheia	4,92	12,50	20,00	30,48	9,56	10,00	10,00	413,8	459,0
D3 [18]	Vazada	5,50	13,97	12,70	30,48	33,02	10,00	19,05	413,8	341,4
D4 [18]	Vazada	5,50	13,97	9,21	30,48	32,60	10,00	22,20	413,8	330,3
T0 [25]	Vazada	8,46	21,50	11,00	30,48	9,44	10,00	16,00	413,8	345,2
T1 [25]	Vazada	8,94	22,70	11,00	30,48	10,51	10,00	12,00	413,8	356,7
T2 [25]	Vazada	8,46	21,50	11,00	30,48	9,87	10,00	12,00	413,8	357,0
T5 [25]	Vazada	10,43	26,50	11,00	30,48	10,06	10,00	8,00	413,8	528,6
VH1 [26]	Vazada	5,98	15,20	10,00	30,48	10,18	10,00	6,00	413,8	447,3
VH2 [26]	Vazada	5,98	15,20	5,00	30,48	4,56	10,00	6,00	413,8	447,3
A1 [7]	Vazada	10,66	27,08	9,00	30,48	10,60	10,00	8,00	413,8	695,9
A2 [7]	Vazada	10,52	26,73	8,00	30,48	12,92	10,00	12,00	413,8	695,9
A3 [7]	Vazada	10,58	26,88	9,50	30,48	12,79	10,00	12,00	413,8	714,8
A4 [7]	Vazada	10,29	26,13	7,00	30,48	7,77	10,00	16,00	413,8	723,9
A5 [7]	Vazada	10,39	26,40	8,00	30,48	7,65	10,00	16,00	413,8	723,9
B2 [7]	Vazada	10,50	26,66	7,50	30,48	8,23	10,00	12,00	413,8	695,9
B3 [7]	Vazada	10,55	26,80	7,00	30,48	8,00	10,00	16,00	413,8	723,9
B4 [7]	Vazada	10,41	26,45	7,50	30,48	12,08	10,00	16,00	413,8	723,9
B5 [7]	Vazada	10,20	25,90	6,00	30,48	8,97	10,00	16,00	413,8	723,9
C1 [7]	Vazada	10,72	27,23	9,00	30,48	10,66	10,00	8,00	413,8	695,9
C2 [7]	Vazada	10,48	26,63	8,00	30,48	12,87	10,00	12,00	413,8	695,9
C3 [7]	Vazada	10,68	27,13	7,50	30,48	8,11	10,00	13,00	413,8	723,9
C4 [7]	Vazada	10,74	27,28	8,00	30,48	12,84	10,00	16,00	413,8	723,9
C5 [7]	Vazada	10,66	27,08	6,50	30,48	12,31	10,00	20,00	413,8	723,9
C6 [7]	Vazada	10,45	26,55	5,00	30,48	7,36	10,00	16,00	413,8	723,9
A095c [23]	Vazada	10,71	27,20	13,00	30,48	22,06	10,00	15,88	413,8	371,0
A120a [23]	Vazada	10,84	27,53	17,00	30,48	22,14	10,00	15,88	413,8	464,0
B065b [23]	Vazada	10,76	27,33	13,00	30,48	20,90	10,00	25,40	413,8	452,0

Quadro V.3 (cont.) - Verificação das disposições construtivas para as armaduras de torção das vigas de referência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	$s_{t,m\acute{a}x}$		$s_{t,ef}$ (cm)	$s_{l,m\acute{a}x}$ (cm)	$s_{l,ef}$ (cm)	$\phi_{l,min}$ (mm)	$\phi_{l,ef,canto}$ (mm)	$f_{y,m\acute{a}x}$ (MPa)	$f_{y,ef}$ (MPa)
		(in)	(cm)							
B080a [23]	Vazada	10,84	27,53	10,00	30,48	21,79	10,00	19,05	413,8	454,0
B110a [23]	Vazada	10,71	27,20	15,00	30,48	21,85	10,00	15,88	413,8	453,0
C065a [23]	Vazada	11,38	28,90	13,00	30,48	23,43	10,00	15,88	413,8	338,0
C100a [23]	Vazada	10,85	27,55	10,00	30,48	21,81	10,00	19,05	413,8	466,0
D075a [23]	Vazada	10,94	27,80	10,00	30,48	22,03	10,00	19,05	413,8	469,0
D090a [23]	Vazada	10,86	27,58	10,00	30,48	21,83	10,00	19,05	413,8	466,0

Quadro V.4 - Características para a verificação das vigas de referência
(ACI 318R-11 [2])

Viga	Tipo de secção	t_{eq} (in)	A_l (in ²)	p_h (in)	A_0 (in ²)	A_{cp} (in ²)	f_{ly} (psi)
B3 [18]	Cheia	7,62	1,76	44,00	97,54	150,00	47500
B4 [18]	Cheia	7,62	2,40	44,00	97,54	150,00	46400
B5 [18]	Cheia	7,62	3,16	44,00	97,54	150,00	48200
B6 [18]	Cheia	7,62	4,00	44,00	97,54	150,00	48100
B7 [18]	Cheia	7,62	0,80	44,00	97,54	150,00	46400
B8 [18]	Cheia	7,62	0,80	44,00	97,54	150,00	46700
B9 [18]	Cheia	7,62	1,76	44,00	97,54	150,00	46300
C4 [18]	Cheia	6,35	1,76	34,00	61,41	100,00	48800
C5 [18]	Cheia	6,35	2,40	34,00	61,41	100,00	47600
C6 [18]	Cheia	6,35	3,16	34,00	61,41	100,00	45800
G3 [18]	Cheia	8,47	1,76	54,00	133,66	200,00	49100
G4 [18]	Cheia	8,47	2,40	54,00	133,66	200,00	47200
G5 [18]	Cheia	8,47	3,16	54,00	133,66	200,00	48000
G7 [18]	Cheia	8,47	1,86	54,00	133,66	200,00	46300
G8 [18]	Cheia	8,47	2,64	54,00	133,66	200,00	46700
I3 [18]	Cheia	7,62	1,76	44,00	97,54	150,00	49800
I4 [18]	Cheia	7,62	2,40	44,00	97,54	150,00	45700
I5 [18]	Cheia	7,62	3,16	44,00	97,54	150,00	45000
I6 [18]	Cheia	7,62	4,00	44,00	97,54	150,00	47200
J1 [18]	Cheia	7,62	0,80	44,00	97,54	150,00	47500
J2 [18]	Cheia	7,62	1,24	44,00	97,54	150,00	46400
J3 [18]	Cheia	7,62	1,76	44,00	97,54	150,00	56350
J4 [18]	Cheia	7,62	2,40	44,00	97,54	150,00	47000
K2 [18]	Cheia	5,83	1,20	45,00	68,85	117,00	48700
K3 [18]	Cheia	5,83	1,86	45,00	68,85	117,00	45800
K4 [18]	Cheia	5,83	2,64	45,00	68,85	117,00	49900
M1 [18]	Cheia	7,62	1,24	44,00	97,54	150,00	47300
M2 [18]	Cheia	7,62	1,76	44,00	97,54	150,00	47700
M3 [18]	Cheia	7,62	2,40	44,00	97,54	150,00	46700
M4 [18]	Cheia	7,62	3,16	44,00	97,54	150,00	46200
M5 [18]	Cheia	7,62	4,00	44,00	97,54	150,00	48600
M6 [18]	Cheia	7,62	4,74	44,00	97,54	150,00	46100
N1 [18]	Cheia	5,08	0,44	32,52	48,53	72,00	51100
N1a [18]	Cheia	5,08	0,44	32,52	48,53	72,00	50200
N2 [18]	Cheia	5,08	0,80	32,52	48,53	72,00	48000
N2a [18]	Cheia	5,08	0,25	32,52	48,53	72,00	48300
N3 [18]	Cheia	5,08	0,66	32,52	48,53	72,00	51000
N4 [18]	Cheia	5,08	1,02	32,52	48,53	72,00	49433

Quadro V.4 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência
(ACI 318R-11 [2])

Viga	Tipo de secção	t_{eq} (in)	A_l (in ²)	p_h (in)	A_0 (in ²)	A_{cp} (in ²)	f_{ly} (psi)
VB2 [26]	Cheia	7,76	1,09	50,39	121,74	163,68	78510
VB3 [26]	Cheia	7,76	1,09	50,39	121,74	163,68	78510
VB4 [26]	Cheia	7,76	1,09	50,39	121,74	163,68	78510
VM1 [26]	Cheia	5,18	0,47	33,54	53,86	72,91	64145
VM2 [26]	Cheia	7,76	1,02	50,39	121,74	163,68	62580
VM3 [26]	Cheia	10,36	1,99	67,32	217,30	291,15	66847
VQ1 [26]	Cheia	8,10	0,54	47,87	121,76	162,71	80785
VQ3 [26]	Cheia	7,04	0,66	57,17	122,48	167,21	62722
VQ9 [26]	Cheia	5,96	0,79	71,34	124,27	174,90	64002
VS2-VQ2 [26]	Cheia	7,76	0,57	50,39	121,74	163,68	62722
VS3 [26]	Cheia	7,76	0,85	50,39	121,74	163,68	62722
VS4-VQ5 [26]	Cheia	7,76	1,13	50,39	121,74	163,68	62722
VS9 [26]	Cheia	7,76	0,54	50,39	121,74	163,68	82777
VS10-VB1 [26]	Cheia	7,76	1,08	50,39	121,74	163,68	82777
VU1 [26]	Cheia	7,76	0,52	50,39	121,74	163,68	64002
VU2 [26]	Cheia	7,76	0,78	50,39	121,74	163,68	64002
VU3 [26]	Cheia	7,76	1,04	50,39	121,74	163,68	64002
VU4 [26]	Cheia	7,76	1,04	50,39	121,74	163,68	64002
A2 [27]	Cheia	6,35	0,80	34,96	64,93	100,00	55100
A3 [27]	Cheia	6,35	1,24	34,52	63,30	100,00	51100
A4 [27]	Cheia	6,35	1,76	34,52	63,30	100,00	50895
B3 [27]	Cheia	5,93	1,24	36,52	60,44	98,00	51100
B4 [27]	Cheia	5,93	1,76	36,52	60,44	98,00	50900
B5UR1 [24]	Cheia	6,09	0,80	34,02	58,04	95,97	55970
B7UR1 [24]	Cheia	6,09	0,80	34,02	58,04	95,97	55970
B9UR1 [24]	Cheia	6,09	0,80	34,02	58,04	95,97	55970
B12UR1 [24]	Cheia	6,09	0,80	34,02	58,04	95,97	55970
B12UR2 [24]	Cheia	6,09	0,80	34,02	58,04	95,97	55970
B12UR3 [24]	Cheia	6,09	1,02	34,02	58,04	95,97	55028
B12UR4 [24]	Cheia	6,09	1,20	34,02	58,04	95,97	54085
B12UR5 [24]	Cheia	6,09	1,24	34,02	58,04	95,97	55100
B14UR1 [24]	Cheia	6,09	0,80	34,02	58,04	95,97	55970
H-06-12 [15]	Cheia	10,29	3,20	59,06	177,86	271,25	59450
H-07-10 [15]	Cheia	10,29	2,64	59,06	177,86	271,25	72500
H-07-16 [15]	Cheia	10,29	4,40	59,06	177,86	271,25	72500
H-12-12 [15]	Cheia	10,29	3,20	59,06	177,86	271,25	59450
H-12-16 [15]	Cheia	10,29	4,40	59,06	177,86	271,25	75400
H-14-10 [15]	Cheia	10,29	2,64	59,06	177,86	271,25	72500

Quadro V.4 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência
(ACI 318R-11 [?])

Viga	Tipo de secção	t_{eq} (in)	A_l (in ²)	p_h (in)	A_0 (in ²)	A_{cp} (in ²)	f_{ly} (psi)
H-20-20 [15]	Cheia	10,29	5,28	59,06	177,86	271,25	81200
N-06-06 [15]	Cheia	10,29	1,86	59,06	177,86	271,25	63800
N-06-12 [15]	Cheia	10,29	3,20	59,06	177,86	271,25	59450
N-07-10 [15]	Cheia	10,29	2,64	59,06	177,86	271,25	72500
N-07-16 [15]	Cheia	10,29	4,40	59,06	177,86	271,25	72500
N-12-12 [15]	Cheia	10,29	3,20	59,06	177,86	271,25	59450
N-12-16 [15]	Cheia	10,29	4,40	59,06	177,86	271,25	75400
N-14-10 [15]	Cheia	10,29	2,64	59,06	177,86	271,25	72500
N-20-20 [15]	Cheia	10,29	5,28	59,06	177,86	271,25	81200
NBS-43-44 [13]	Cheia	10,29	1,18	59,06	177,86	271,25	58000
NBS-82-13 [13]	Cheia	10,29	2,21	59,06	177,86	271,25	71485
SW4-1 [29]	Cheia	5,63	1,22	39,37	52,70	104,63	66555
D3 [18]	Vazada	2,50	1,76	44,00	97,54	150,00	49500
D4 [18]	Vazada	2,50	2,40	44,00	97,54	150,00	47900
T0 [25]	Vazada	3,15	4,98	67,72	243,61	387,50	50053
T1 [25]	Vazada	3,15	2,80	71,50	271,56	387,50	51724
T2 [25]	Vazada	3,15	2,80	67,72	243,61	387,50	51759
T5 [25]	Vazada	3,15	1,55	83,46	317,39	496,00	76644
VH1 [26]	Vazada	3,15	0,54	47,87	121,76	162,71	64856
VH2 [26]	Vazada	3,15	1,07	47,87	121,76	162,71	64856
A1 [7]	Vazada	3,86	1,01	85,28	386,29	558,00	100906
A2 [7]	Vazada	4,20	2,16	84,17	376,38	558,00	97501
A3 [7]	Vazada	4,29	2,80	84,65	380,63	558,00	97501
A4 [7]	Vazada	4,11	3,68	82,28	359,68	558,00	104964
A5 [7]	Vazada	4,10	4,75	83,15	367,30	558,00	104964
B2 [7]	Vazada	4,25	2,26	83,98	374,64	558,00	97501
B3 [7]	Vazada	4,29	3,68	84,41	378,51	558,00	104964
B4 [7]	Vazada	4,42	4,99	83,31	368,64	558,00	104964
B5 [7]	Vazada	4,59	6,23	81,57	353,52	558,00	104964
C1 [7]	Vazada	3,81	1,01	85,75	390,59	558,00	100906
C2 [7]	Vazada	3,95	2,16	83,86	373,59	558,00	97501
C3 [7]	Vazada	4,04	3,68	85,43	387,74	558,00	104964
C4 [7]	Vazada	4,05	4,75	85,91	392,05	558,00	104964
C5 [7]	Vazada	4,09	5,69	85,28	386,32	558,00	104964
C6 [7]	Vazada	4,09	7,48	83,62	371,48	558,00	104964
A095c [23]	Vazada	5,71	2,04	85,67	374,81	547,72	53795
A120a [23]	Vazada	7,24	3,10	86,69	383,76	559,46	67280
B065b [23]	Vazada	3,62	7,90	86,06	379,37	553,55	65540

Quadro V.4 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência
(ACI 318R-11 [?])

Viga	Tipo de secção	t_{eq} (in)	A_l (in ²)	p_h (in)	A_0 (in ²)	A_{cp} (in ²)	f_{ly} (psi)
B080a [23]	Vazada	4,41	4,40	86,69	383,18	558,78	65830
B110a [23]	Vazada	6,10	3,10	85,67	375,09	548,05	65685
C065a [23]	Vazada	3,35	3,10	91,02	413,21	599,22	49010
C100a [23]	Vazada	5,00	4,40	86,77	383,47	559,21	67570
D075a [23]	Vazada	3,43	4,40	87,56	388,94	566,58	68005
D090a [23]	Vazada	4,13	4,40	86,85	384,63	560,67	67570

Quadro V.5 - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência
(ACI 318R-11 [2])

Viga	Tipo secção	$A_{t,min}/s$		$A_{t,max}/s$		$A_{t,ef}/s$	$A_{l,min}$		$A_{l,ef}$	$S_{t,máx}$		$S_{t,ef}$
		(in ² /in)	(cm ² /m)	(in ² /in)	(cm ² /m)	(cm ² /m)	(in ²)	(cm ²)	(cm ²)	(in)	(cm)	(cm)
B3 [18]	Cheia	0,0053	1,33	0,0280	7,10	10,16	-0,75	<0	11,36	5,50	13,97	12,70
B4 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0294	7,45	14,01	-1,38	<0	15,48	5,50	13,97	9,21
B5 [18]	Cheia	0,0052	1,31	0,0290	7,35	18,47	-2,16	<0	20,39	5,50	13,97	6,99
B6 [18]	Cheia	0,0052	1,32	0,0277	7,03	22,57	-2,90	<0	25,81	5,50	13,97	5,72
B7 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0409	10,38	10,16	-0,77	<0	5,16	5,50	13,97	12,70
B8 [18]	Cheia	0,0054	1,36	0,0615	15,60	22,57	-2,91	<0	5,16	5,50	13,97	5,72
B9 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0197	5,00	4,66	0,24	1,55	11,36	5,50	13,97	15,24
C4 [18]	Cheia	0,0051	1,30	0,0218	5,53	13,11	-1,11	<0	11,36	4,25	10,80	9,84
C5 [18]	Cheia	0,0053	1,33	0,0223	5,65	17,66	-1,70	<0	15,48	4,25	10,80	7,30
C6 [18]	Cheia	0,0055	1,38	0,0236	5,99	23,90	-2,51	<0	20,39	4,25	10,80	5,40
G3 [18]	Cheia	0,0051	1,29	0,0296	7,51	8,29	-0,49	<0	11,36	6,75	17,15	15,56
G4 [18]	Cheia	0,0053	1,34	0,0316	8,01	11,29	-1,04	<0	15,48	6,75	17,15	11,43
G5 [18]	Cheia	0,0052	1,32	0,0305	7,73	15,05	-1,90	<0	20,39	6,75	17,15	8,57
G7 [18]	Cheia	0,0054	1,38	0,0339	8,59	8,83	-0,43	<0	12,00	6,75	17,15	14,61
G8 [18]	Cheia	0,0054	1,36	0,0318	8,07	12,31	-1,24	<0	17,03	6,75	17,15	10,48
I3 [18]	Cheia	0,0061	1,54	0,0337	8,55	10,16	-0,55	<0	11,36	5,50	13,97	12,70
I4 [18]	Cheia	0,0066	1,68	0,0371	9,40	14,01	-1,10	<0	15,48	5,50	13,97	9,21
I5 [18]	Cheia	0,0067	1,71	0,0377	9,56	18,47	-1,85	<0	20,39	5,50	13,97	6,99
I6 [18]	Cheia	0,0065	1,64	0,0356	9,03	22,57	-2,62	<0	25,81	5,50	13,97	5,72
J1 [18]	Cheia	0,0053	1,33	0,0201	5,10	4,66	-0,09	<0	5,16	5,50	13,97	15,24
J2 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0207	5,26	7,21	-0,51	<0	8,00	5,50	13,97	9,84
J3 [18]	Cheia	0,0044	1,12	0,0183	4,65	10,16	-1,10	<0	11,36	5,50	13,97	12,70
J4 [18]	Cheia	0,0053	1,35	0,0220	5,58	14,01	-1,64	<0	15,48	5,50	13,97	9,21
K2 [18]	Cheia	0,0031	0,78	0,0197	5,00	6,78	-0,40	<0	7,74	5,63	14,29	10,48
K3 [18]	Cheia	0,0033	0,83	0,0203	5,15	10,42	-1,02	<0	12,00	5,63	14,29	12,38
K4 [18]	Cheia	0,0030	0,76	0,0187	4,74	15,05	-1,91	<0	17,03	5,63	14,29	8,57
M1 [18]	Cheia	0,0053	1,34	0,0237	6,00	4,76	0,22	1,41	8,00	5,50	13,97	14,92
M2 [18]	Cheia	0,0052	1,33	0,0238	6,03	6,78	-0,13	<0	11,36	5,50	13,97	10,48
M3 [18]	Cheia	0,0054	1,36	0,0227	5,76	9,23	-0,60	<0	15,48	5,50	13,97	13,97
M4 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0230	5,84	12,31	-1,13	<0	20,39	5,50	13,97	10,48
M5 [18]	Cheia	0,0051	1,30	0,0225	5,70	15,63	-1,72	<0	25,81	5,50	13,97	8,26
M6 [18]	Cheia	0,0054	1,37	0,0223	5,66	15,63	-1,65	<0	30,58	5,50	13,97	8,26
N1 [18]	Cheia	0,0029	0,74	0,0182	4,61	3,51	0,01	0,08	2,84	4,06	10,33	9,21
N1a [18]	Cheia	0,0030	0,76	0,0182	4,62	3,51	0,01	0,09	2,84	4,06	10,33	9,21
N2 [18]	Cheia	0,0031	0,79	0,0196	4,97	6,36	-0,32	<0	5,16	4,06	10,33	5,08
N2a [18]	Cheia	0,0031	0,79	0,0333	8,45	6,21	-0,32	<0	1,61	4,06	10,33	11,43
N3 [18]	Cheia	0,0029	0,75	0,0172	4,36	5,09	-0,21	<0	4,26	4,06	10,33	6,35
N4 [18]	Cheia	0,0030	0,77	0,0179	4,54	7,99	-0,56	<0	6,58	4,06	10,33	8,89
VB2 [26]	Cheia	0,0055	1,40	0,0185	4,69	5,84	-0,51	<0	7,01	6,30	16,00	5,00

Quadro V.5 (cont.) - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (ACI 318R-11 [2])

Viga	Tipo secção	$A_{t,min}/s$		$A_{t,max}/s$		$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)	$A_{l,min}$		$A_{l,ef}$ (cm ²)	$s_{t,máx}$		$s_{t,ef}$ (cm)
		(in ² /in)	(cm ² /m)	(in ² /in)	(cm ² /m)		(in ²)	(cm ²)		(in)	(cm)	
VB3 [26]	Cheia	0,0062	1,58	0,0225	5,71	5,84	-0,37	<0	7,01	6,30	16,00	5,00
VB4 [26]	Cheia	0,0070	1,78	0,0254	6,44	5,84	-0,27	<0	7,01	6,30	16,00	5,00
VM1 [26]	Cheia	0,0051	1,29	0,0180	4,56	3,63	-0,05	<0	3,00	4,19	10,65	3,50
VM2 [26]	Cheia	0,0075	1,90	0,0267	6,77	5,32	-0,11	<0	6,60	6,30	16,00	5,30
VM3 [26]	Cheia	0,0099	2,50	0,0338	8,56	7,14	-0,23	<0	12,84	8,42	21,38	7,00
VQ1 [26]	Cheia	0,0039	1,00	0,0157	3,97	2,88	-0,01	<0	3,46	5,98	15,20	10,00
VQ3 [26]	Cheia	0,0091	2,31	0,0165	4,19	3,05	-0,01	<0	4,27	7,15	18,15	10,00
VQ9 [26]	Cheia	0,0124	3,14	0,0137	3,46	2,82	-0,07	<0	5,08	8,92	22,65	10,00
VS2-VQ2 [26]	Cheia	0,0069	1,75	0,0197	4,98	3,05	0,08	0,51	3,66	6,30	16,00	10,00
VS3 [26]	Cheia	0,0069	1,75	0,0199	5,03	4,55	-0,21	<0	5,49	6,30	16,00	6,70
VS4-VQ5 [26]	Cheia	0,0069	1,75	0,0197	4,98	6,10	-0,53	<0	7,32	6,30	16,00	5,00
VS9 [26]	Cheia	0,0052	1,33	0,0143	3,63	2,90	-0,08	<0	3,48	6,30	16,00	10,00
VS10-VB1 [26]	Cheia	0,0052	1,33	0,0149	3,77	5,80	-0,63	<0	6,96	6,30	16,00	5,00
VU1 [26]	Cheia	0,0068	1,72	0,0276	6,99	5,60	-0,43	<0	3,36	6,30	16,00	5,00
VU2 [26]	Cheia	0,0068	1,72	0,0225	5,71	5,60	-0,43	<0	5,04	6,30	16,00	5,00
VU3 [26]	Cheia	0,0068	1,72	0,0164	4,16	4,18	-0,17	<0	6,72	6,30	16,00	6,70
VU4 [26]	Cheia	0,0068	1,72	0,0134	3,41	2,80	0,11	<0	6,72	6,30	16,00	10,00
A2 [27]	Cheia	0,0051	1,28	0,0274	6,94	7,82	-0,40	<0	5,16	4,37	11,10	4,13
A3 [27]	Cheia	0,0055	1,41	0,0253	6,41	8,94	-0,48	<0	8,00	4,31	10,96	7,94
A4 [27]	Cheia	0,0056	1,41	0,0250	6,35	12,42	-0,95	<0	11,36	4,31	10,96	5,72
B3 [27]	Cheia	0,0038	0,97	0,0228	5,77	8,60	-0,52	<0	8,00	4,56	11,60	8,26
B4 [27]	Cheia	0,0039	0,98	0,0224	5,68	11,77	-0,97	<0	11,36	4,56	11,60	6,03
B5UR1 [24]	Cheia	0,0041	1,03	0,0228	5,78	6,56	-0,23	<0	5,16	4,25	10,80	10,80
B7UR1 [24]	Cheia	0,0052	1,31	0,0291	7,38	6,56	-0,05	<0	5,16	4,25	10,80	10,80
B9UR1 [24]	Cheia	0,0056	1,42	0,0314	7,95	6,56	0,01	0,10	5,16	4,25	10,80	10,80
B12UR1 [24]	Cheia	0,0058	1,47	0,0325	8,24	6,56	0,05	0,31	5,16	4,25	10,80	10,80
B12UR2 [24]	Cheia	0,0056	1,43	0,0325	8,25	6,95	-0,03	<0	5,16	4,25	10,80	10,20
B12UR3 [24]	Cheia	0,0056	1,42	0,0297	7,53	7,46	-0,10	<0	6,58	4,25	10,80	9,50
B12UR4 [24]	Cheia	0,0058	1,47	0,0292	7,40	7,88	-0,12	<0	7,74	4,25	10,80	9,00
B12UR5 [24]	Cheia	0,0057	1,45	0,0321	8,15	10,13	-0,44	<0	8,00	4,25	10,80	7,00
B14UR1 [24]	Cheia	0,0062	1,58	0,0351	8,90	6,56	0,12	0,78	5,16	4,25	10,80	10,80
H-06-12 [15]	Cheia	0,0093	2,35	0,0365	9,26	7,10	0,78	5,05	20,65	7,38	18,75	10,00
H-07-10 [15]	Cheia	0,0071	1,80	0,0325	8,23	7,89	0,03	0,19	17,03	7,38	18,75	9,00
H-07-16 [15]	Cheia	0,0071	1,80	0,0251	6,37	7,89	0,03	0,19	28,39	7,38	18,75	9,00
H-12-12 [15]	Cheia	0,0093	2,35	0,0517	13,10	14,20	-0,87	<0	20,65	7,38	18,75	5,00
H-12-16 [15]	Cheia	0,0073	1,85	0,0347	8,81	14,20	-1,38	<0	28,39	7,38	18,75	5,00
H-14-10 [15]	Cheia	0,0071	1,80	0,0464	11,76	16,13	-1,89	<0	17,03	7,38	18,75	8,00
H-20-20 [15]	Cheia	0,0068	1,72	0,0379	9,59	23,45	-3,67	<0	34,06	7,38	18,75	5,50

Quadro V.5 (cont.) - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (ACI 318R-11 [2])

Viga	Tipo secção	$A_{t,min}/s$		$A_{t,max}/s$		$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)	$A_{l,min}$		$A_{l,ef}$ (cm ²)	$s_{t,máx}$		$s_{t,ef}$ (cm)
		(in ² /in)	(cm ² /m)	(in ² /in)	(cm ² /m)		(in ²)	(cm ²)		(in)	(cm)	
N-06-06 [15]	Cheia	0,0058	1,47	0,0300	7,61	7,10	-0,13	<0	12,00	7,38	18,75	10,00
N-06-12 [15]	Cheia	0,0062	1,58	0,0246	6,23	7,10	-0,01	<0	20,65	7,38	18,75	10,00
N-07-10 [15]	Cheia	0,0050	1,26	0,0227	5,76	7,89	-0,53	<0	17,03	7,38	18,75	9,00
N-07-16 [15]	Cheia	0,0050	1,26	0,0176	4,46	7,89	-0,53	<0	28,39	7,38	18,75	9,00
N-12-12 [15]	Cheia	0,0062	1,58	0,0347	8,81	14,20	-1,66	<0	20,65	7,38	18,75	5,00
N-12-16 [15]	Cheia	0,0049	1,25	0,0234	5,92	14,20	-2,01	<0	28,39	7,38	18,75	5,00
N-14-10 [15]	Cheia	0,0050	1,26	0,0325	8,23	16,13	-2,45	<0	17,03	7,38	18,75	8,00
N-20-20 [15]	Cheia	0,0046	1,16	0,0255	6,45	23,45	-4,25	<0	34,06	7,38	18,75	5,50
NBS-43-44 [13]	Cheia	0,0063	1,61	0,0349	8,85	5,09	0,48	3,11	7,60	7,38	18,75	14,00
NBS-82-13 [13]	Cheia	0,0051	1,31	0,0118	3,00	1,67	0,96	6,22	14,25	7,38	18,75	19,00
SW4-1 [29]	Cheia	0,0027	0,68	0,0107	2,72	3,93	0,02	0,13	7,85	4,92	12,50	20,00
D3 [18]	Vazada	0,0051	1,28	0,0204	5,18	6,30	-0,12	<0	11,36	5,50	13,97	12,70
D4 [18]	Vazada	0,0052	1,32	0,0280	7,09	14,01	-1,38	<0	15,48	5,50	13,97	9,21
T0 [25]	Vazada	0,0119	3,02	0,0274	6,96	8,50	0,87	5,58	32,16	8,46	21,50	11,00
T1 [25]	Vazada	0,0102	2,59	0,0354	8,97	10,28	-0,21	<0	18,10	8,94	22,70	11,00
T2 [25]	Vazada	0,0102	2,59	0,0313	7,93	8,50	0,41	2,66	18,10	8,46	21,50	11,00
T5 [25]	Vazada	0,0127	3,23	0,0365	9,24	8,50	-0,12	<0	10,00	10,43	26,50	11,00
VH1 [26]	Vazada	0,0049	1,25	0,0185	4,70	2,88	0,08	0,54	3,46	5,98	15,20	10,00
VH2 [26]	Vazada	0,0049	1,25	0,0371	9,40	23,04	-3,72	<0	6,91	5,98	15,20	5,00
A1 [7]	Vazada	0,0080	2,04	0,0272	6,91	3,11	1,36	8,78	6,53	10,66	27,08	9,00
A2 [7]	Vazada	0,0073	1,84	0,0275	6,96	6,25	0,23	1,47	13,95	10,52	26,73	8,00
A3 [7]	Vazada	0,0070	1,77	0,0278	7,04	8,32	-0,61	<0	18,10	10,58	26,88	9,50
A4 [7]	Vazada	0,0076	1,93	0,0280	7,09	11,29	-1,24	<0	23,75	10,29	26,13	7,00
A5 [7]	Vazada	0,0080	2,02	0,0281	7,11	14,13	-1,96	<0	30,66	10,39	26,40	8,00
B2 [7]	Vazada	0,0088	2,24	0,0341	8,64	6,67	0,60	3,85	14,58	10,50	26,66	7,50
B3 [7]	Vazada	0,0091	2,30	0,0353	8,95	11,29	-0,88	<0	23,75	10,55	26,80	7,00
B4 [7]	Vazada	0,0098	2,48	0,0374	9,49	15,07	-1,73	<0	32,17	10,41	26,45	7,50
B5 [7]	Vazada	0,0096	2,42	0,0377	9,55	18,83	-2,82	<0	40,21	10,20	25,90	6,00
C1 [7]	Vazada	0,0111	2,81	0,0371	9,41	3,11	2,23	14,37	6,53	10,72	27,23	9,00
C2 [7]	Vazada	0,0103	2,61	0,0365	9,26	6,25	1,22	7,87	13,95	10,48	26,63	8,00
C3 [7]	Vazada	0,0098	2,50	0,0350	8,87	10,53	-0,44	<0	23,75	10,68	27,13	7,50
C4 [7]	Vazada	0,0105	2,65	0,0370	9,37	14,13	-1,38	<0	30,66	10,74	27,28	8,00
C5 [7]	Vazada	0,0108	2,73	0,0388	9,83	17,38	-2,27	<0	36,69	10,66	27,08	6,50
C6 [7]	Vazada	0,0095	2,41	0,0350	8,87	22,60	-4,45	<0	48,25	10,45	26,55	5,00
A095c [23]	Vazada	0,0097	2,47	0,0538	13,64	5,88	1,65	10,65	13,16	10,71	27,20	13,00
A120a [23]	Vazada	0,0073	1,86	0,0211	5,34	2,63	1,73	11,19	20,00	10,84	27,53	17,00
B065b [23]	Vazada	0,0085	2,17	0,0167	4,24	5,88	1,19	7,70	50,97	10,76	27,33	13,00
B080a [23]	Vazada	0,0092	2,33	0,0440	11,16	12,90	-0,92	<0	28,39	10,84	27,53	10,00

Quadro V.5 (cont.) - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (ACI 318R-11 [2])

Viga	Tipo secção	$A_{t,min}/s$		$A_{t,max}/s$		$A_{t,ef}/s$	$A_{l,min}$		$A_{l,ef}$	$S_{t,máx}$		$S_{t,ef}$
		(in^2/in)	(cm^2/m)	(in^2/in)	(cm^2/m)		(in^2)	(cm^2)		(in)	(cm)	
B110a [23]	Vazada	0,0093	2,37	0,0338	8,56	3,82	2,19	14,16	20,00	10,71	27,20	15,00
C065a [23]	Vazada	0,0159	4,04	0,0481	12,20	5,88	4,43	28,57	20,00	11,38	28,90	13,00
C100a [23]	Vazada	0,0125	3,17	0,0679	17,21	12,90	0,34	2,17	28,39	10,85	27,55	10,00
D075a [23]	Vazada	0,0127	3,21	0,0475	12,04	12,90	0,44	2,84	28,39	10,94	27,80	10,00
D090a [23]	Vazada	0,0136	3,44	0,0607	15,38	12,90	0,73	4,68	28,39	10,86	27,58	10,00

Quadro V.6 - Características para a verificação das vigas de referência
(MC 90 [9])

Viga	Tipo secção	x (cm)	y (cm)	t_{ef} (cm)	u_s (m)	A (m ²)	s (cm)	A_{li} (cm ²)	f_c (MPa)	f_{c2} (MPa)	f_{ty} (MPa)	f_{ly} (MPa)	z (cm)
B3 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	12,70	5,68	28,07	15,49	327,6	327,6	30,48
B4 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	9,21	7,74	29,17	16,02	320,0	320,0	30,48
B5 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	6,99	10,19	30,55	16,68	332,4	332,4	30,48
B6 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	5,72	12,90	28,83	15,86	331,7	331,7	30,48
B7 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	12,70	2,58	26,00	14,48	320,0	320,0	30,48
B8 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	5,72	2,58	26,76	14,85	322,1	322,1	30,48
B9 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	15,24	5,68	28,83	15,86	319,3	319,3	30,48
C4 [18]	Cheia	25,4	25,4	6,35	3,6	0,01	9,84	5,68	27,17	15,05	336,6	336,6	19,05
C5 [18]	Cheia	25,4	25,4	6,35	3,6	0,01	7,30	7,74	27,24	15,09	328,3	328,3	19,05
C6 [18]	Cheia	25,4	25,4	6,35	3,6	0,01	5,40	10,19	27,59	15,25	315,9	315,9	19,05
G3 [18]	Cheia	25,4	50,8	8,47	7,2	0,01	15,56	5,68	26,83	14,88	338,6	338,6	42,33
G4 [18]	Cheia	25,4	50,8	8,47	7,2	0,01	11,43	7,74	28,28	15,59	325,5	325,5	42,33
G5 [18]	Cheia	25,4	50,8	8,47	7,2	0,01	8,57	10,19	26,90	14,92	331,0	331,0	42,33
G7 [18]	Cheia	25,4	50,8	8,47	7,2	0,01	14,61	6,00	30,97	16,87	319,3	319,3	42,33
G8 [18]	Cheia	25,4	50,8	8,47	7,2	0,01	10,48	8,52	28,35	15,62	322,1	322,1	42,33
I3 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	12,70	5,68	44,76	22,91	343,4	343,4	30,48
I4 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	9,21	7,74	44,97	22,99	315,2	315,2	30,48
I5 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	6,99	10,19	45,03	23,02	310,3	310,3	30,48
I6 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	5,72	12,90	45,79	23,32	325,5	325,5	30,48
J1 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	15,24	2,58	14,35	8,39	327,6	327,6	30,48
J2 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	9,84	4,00	14,55	8,50	320,0	320,0	30,48
J3 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	12,70	5,68	16,90	9,78	388,6	388,6	30,48
J4 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	9,21	7,74	16,76	9,70	324,1	324,1	30,48
K2 [18]	Cheia	15,2	49,5	5,83	4,1	0,01	10,48	3,87	30,62	16,71	335,9	335,9	43,70
K3 [18]	Cheia	15,2	49,5	5,83	4,1	0,01	12,38	6,00	29,03	15,95	315,9	315,9	43,70
K4 [18]	Cheia	15,2	49,5	5,83	4,1	0,01	8,57	8,52	28,62	15,76	344,1	344,1	43,70
M1 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	14,92	4,00	29,86	16,35	326,2	326,2	30,48
M2 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	10,48	5,68	30,55	16,68	329,0	329,0	30,48
M3 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	13,97	7,74	26,76	14,85	322,1	322,1	30,48
M4 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	10,48	10,19	26,55	14,75	318,6	318,6	30,48
M5 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	8,26	12,90	28,00	15,46	335,2	335,2	30,48
M6 [18]	Cheia	25,4	38,1	7,62	5,4	0,01	8,26	15,29	29,38	16,12	317,9	317,9	30,48
N1 [18]	Cheia	15,2	30,5	5,08	2,6	0,01	9,21	1,42	29,52	16,19	352,4	352,4	25,40
N1a [18]	Cheia	15,2	30,5	5,08	2,6	0,01	9,21	1,42	28,69	15,79	346,2	346,2	25,40
N2 [18]	Cheia	15,2	30,5	5,08	2,6	0,01	5,08	2,58	30,41	16,61	331,0	331,0	25,40
N2a [18]	Cheia	15,2	30,5	5,08	2,6	0,01	11,43	2,58	28,41	15,66	333,1	333,1	25,40
N3 [18]	Cheia	15,2	30,5	5,08	2,6	0,01	6,35	2,13	27,31	15,12	351,7	351,7	25,40
N4 [18]	Cheia	15,2	30,5	5,08	2,6	0,01	8,89	3,29	27,31	15,12	340,9	340,9	25,40

Quadro V.6 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência (MC 90 [9])

Viga	Tipo secção	x (cm)	y (cm)	t_{ef} (cm)	u_s (m)	A (m ²)	s (cm)	A_{li} (cm ²)	f_c (MPa)	f_{c2} (MPa)	f_{ty} (MPa)	f_{ly} (MPa)	z (cm)
VB2 [26]	Cheia	44,0	24,0	7,76	5,9	0,010	5,00	2,63	26,40	14,67	541,4	541,4	36,24
VB3 [26]	Cheia	44,0	24,0	7,76	5,9	0,010	5,00	2,63	39,10	20,54	541,4	541,4	36,24
VB4 [26]	Cheia	44,0	24,0	7,76	5,9	0,010	5,00	2,63	49,80	24,88	541,4	541,4	36,24
VM1 [26]	Cheia	29,4	16,0	5,18	2,6	0,007	3,50	1,50	39,10	20,54	442,4	442,4	24,22
VM2 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	5,30	3,30	36,10	19,23	431,6	431,6	36,24
VM3 [26]	Cheia	58,70	32,00	10,36	10,5	0,014	7,00	6,42	40,00	20,93	461,0	461,0	48,34
VQ1 [26]	Cheia	32,40	32,40	8,10	5,9	0,010	10,00	1,15	19,00	10,90	557,1	557,1	24,30
VQ3 [26]	Cheia	58,00	18,60	7,04	5,9	0,013	10,00	1,83	17,60	10,15	432,6	432,6	50,96
VQ9 [26]	Cheia	80,60	14,00	5,96	6,0	0,017	10,00	2,54	19,50	11,16	441,4	441,4	74,64
VS2-VQ2 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	10,00	1,53	19,00	10,90	432,6	432,6	36,24
VS3 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	6,70	2,14	19,50	11,16	432,6	432,6	36,24
VS4-VQ5 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	5,00	2,75	19,00	10,90	432,6	432,6	36,24
VS9 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	10,00	1,45	17,60	10,15	570,9	570,9	36,24
VS10-VB1 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	5,00	2,61	19,00	10,90	570,9	570,9	36,24
VU1 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	5,00	1,40	19,50	11,16	441,4	441,4	36,24
VU2 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	5,00	1,96	19,50	11,16	441,4	441,4	36,24
VU3 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	6,70	2,52	18,50	10,63	441,4	441,4	36,24
VU4 [26]	Cheia	44,00	24,00	7,76	5,9	0,010	10,00	2,52	18,50	10,63	441,4	441,4	36,24
A2 [27]	Cheia	25,40	25,40	6,35	3,6	0,008	4,13	2,58	38,20	20,15	380,0	380,0	19,05
A3 [27]	Cheia	25,40	25,40	6,35	3,6	0,008	7,94	4,00	39,38	20,66	352,4	352,4	19,05
A4 [27]	Cheia	25,40	25,40	6,35	3,6	0,008	5,72	5,68	39,17	20,57	351,0	351,0	19,05
B3 [27]	Cheia	17,78	35,56	5,93	3,5	0,008	8,26	4,00	38,62	20,33	352,4	352,4	29,63
B4 [27]	Cheia	17,78	35,56	5,93	3,5	0,008	6,03	5,68	38,48	20,27	351,0	351,0	29,63
B5UR1 [24]	Cheia	20,30	30,50	6,09	3,5	0,008	10,80	2,58	39,60	20,76	386,0	386,0	24,41
B7UR1 [24]	Cheia	20,30	30,50	6,09	3,5	0,008	10,80	2,58	64,60	29,98	386,0	386,0	24,41
B9UR1 [24]	Cheia	20,30	30,50	6,09	3,5	0,008	10,80	2,58	75,00	32,94	386,0	386,0	24,41
B12UR1 [24]	Cheia	20,30	30,50	6,09	3,5	0,008	10,80	2,58	80,60	34,32	386,0	386,0	24,41
B12UR2 [24]	Cheia	20,30	30,50	6,09	3,5	0,008	10,20	2,58	76,20	33,25	386,0	386,0	24,41
B12UR3 [24]	Cheia	20,30	30,50	6,09	3,5	0,008	9,50	3,29	72,90	32,39	379,5	379,5	24,41
B12UR4 [24]	Cheia	20,30	30,50	6,09	3,5	0,008	9,00	3,87	75,90	33,17	373,0	373,0	24,41
B12UR5 [24]	Cheia	20,30	30,50	6,09	3,5	0,008	7,00	4,00	76,70	33,37	380,0	380,0	24,41
B14UR1 [24]	Cheia	20,30	30,50	6,09	3,5	0,008	10,80	2,58	93,90	36,98	386,0	386,0	24,41
H-06-12 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	10,00	7,74	78,50	33,82	410,0	410,0	39,71
H-07-10 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	9,00	8,52	68,40	31,12	500,0	500,0	39,71
H-07-16 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	9,00	11,35	68,40	31,12	500,0	500,0	39,71
H-12-12 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	5,00	7,74	78,50	33,82	410,0	410,0	39,71
H-12-16 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	5,00	11,35	78,50	33,82	520,0	520,0	39,71
H-14-10 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	8,00	8,52	68,40	31,12	500,0	500,0	39,71

Quadro V.6 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência (MC 90 [9])

Viga	Tipo secção	x (cm)	y (cm)	t_{ef} (cm)	u_s (m)	A (m ²)	s (cm)	A_{li} (cm ²)	f_c (MPa)	f_{c2} (MPa)	f_{ty} (MPa)	f_{ly} (MPa)	z (cm)
H-20-20 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	5,50	14,19	78,50	33,82	560,0	560,0	39,71
N-06-06 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	10,00	6,00	35,50	18,96	440,0	440,0	39,71
N-06-12 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	10,00	7,74	35,50	18,96	410,0	410,0	39,71
N-07-10 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	9,00	8,52	33,50	18,05	500,0	500,0	39,71
N-07-16 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	9,00	11,35	33,50	18,05	500,0	500,0	39,71
N-12-12 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	5,00	7,74	35,50	18,96	410,0	410,0	39,71
N-12-16 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	5,00	11,35	35,50	18,96	520,0	520,0	39,71
N-14-10 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	8,00	8,52	33,50	18,05	500,0	500,0	39,71
N-20-20 [15]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	5,50	14,19	35,50	18,96	560,0	560,0	39,71
NBS-43-44 [13]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	14,00	3,80	35,00	18,73	400,0	400,0	39,71
NBS-82-13 [13]	Cheia	35,00	50,00	10,29	9,8	0,013	19,00	7,13	35,00	18,73	493,0	493,0	39,71
SW4-1 [29]	Cheia	15,00	45,00	5,63	3,7	0,010	20,00	3,93	44,20	22,68	459,0	459,0	39,38
D3 [18]	Vazada	25,40	38,10	6,35	7,4	0,011	12,70	11,36	28,41	15,66	341,4	341,4	34,29
D4 [18]	Vazada	25,40	38,10	6,35	7,4	0,011	9,21	15,48	30,62	16,71	330,3	330,3	34,29
T0 [25]	Vazada	50,00	50,00	8,00	18,5	0,017	11,00	32,16	45,11	23,05	345,2	345,2	43,00
T1 [25]	Vazada	50,00	50,00	8,00	20,6	0,018	11,00	18,10	35,28	18,86	356,7	356,7	45,40
T2 [25]	Vazada	50,00	50,00	8,00	18,5	0,017	11,00	18,10	35,30	18,87	357,0	357,0	43,00
T5 [25]	Vazada	80,00	40,00	8,00	24,1	0,021	11,00	10,00	47,07	23,83	528,6	528,6	73,00
VH1 [26]	Vazada	32,40	32,40	8,00	9,2	0,012	10,00	3,46	17,17	9,92	447,3	447,3	30,40
VH2 [26]	Vazada	32,40	32,40	8,00	9,2	0,012	5,00	6,91	17,17	9,92	447,3	447,3	30,40
A1 [7]	Vazada	60,00	60,00	9,81	29,3	0,022	9,00	6,53	48,43	24,36	636,7	695,9	54,65
A2 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,67	28,6	0,021	8,00	13,95	47,34	23,93	695,9	672,4	53,10
A3 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,90	28,9	0,022	9,50	18,10	46,15	23,46	714,8	672,4	53,50
A4 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,43	27,3	0,021	7,00	23,75	54,78	26,72	714,8	723,9	52,50
A5 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,41	27,9	0,021	8,00	30,66	53,10	26,11	672,4	723,9	52,80
B2 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,80	28,4	0,021	7,50	14,58	69,78	31,52	695,9	672,4	53,40
B3 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,90	28,7	0,021	7,00	23,75	77,82	33,65	714,8	723,9	53,70
B4 [7]	Vazada	60,00	60,00	11,23	28,0	0,021	7,50	32,17	79,80	34,13	672,4	723,9	53,55
B5 [7]	Vazada	60,00	60,00	11,67	26,8	0,021	6,00	40,21	76,39	33,30	672,4	723,9	51,80
C1 [7]	Vazada	60,00	60,00	9,69	29,6	0,022	9,00	6,53	91,74	36,61	636,7	695,9	54,90
C2 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,04	28,4	0,021	8,00	13,95	94,81	37,13	695,9	672,4	53,30
C3 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,25	29,4	0,022	7,50	23,75	91,57	36,58	714,8	723,9	54,00
C4 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,29	29,8	0,022	8,00	30,66	91,38	36,54	672,4	723,9	54,50
C5 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,38	29,3	0,022	6,50	36,69	96,68	37,43	672,4	723,9	54,30
C6 [7]	Vazada	60,00	60,00	10,38	28,2	0,021	5,00	48,25	87,48	35,80	723,9	723,9	52,90
A095c [23]	Vazada	49,70	71,10	14,50	28,4	0,022	13,00	13,16	35,10	18,78	371,0	371,0	65,10
A120a [23]	Vazada	50,20	71,90	14,78	20,2	0,019	17,00	20,00	27,60	15,26	464,0	464,0	57,12
B065b [23]	Vazada	50,30	71,00	9,20	28,8	0,022	13,00	50,97	39,20	20,58	452,0	452,0	65,00

Quadro V.6 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência (MC 90 [9])

Viga	Tipo secção	x (cm)	y (cm)	t_{ef} (cm)	u_s (m)	A (m ²)	s (cm)	A_{li} (cm ²)	f_c (MPa)	f_{c2} (MPa)	f_{ty} (MPa)	f_{ly} (MPa)	z (cm)
B080a [23]	Vazada	50,00	72,10	11,20	29,1	0,022	10,00	11,36	46,50	23,60	454,0	454,0	66,10
B110a [23]	Vazada	49,80	71,00	14,63	19,8	0,018	15,00	8,00	48,10	24,23	453,0	453,0	65,00
C065a [23]	Vazada	49,50	78,10	8,50	31,4	0,023	13,00	8,00	78,80	33,89	338,0	338,0	72,10
C100a [23]	Vazada	49,90	72,30	12,70	29,1	0,022	10,00	11,36	90,60	36,40	466,0	466,0	66,30
D075a [23]	Vazada	49,80	73,40	8,70	29,5	0,022	10,00	11,36	94,90	37,15	469,0	469,0	67,40
D090a [23]	Vazada	50,10	72,20	10,50	29,2	0,022	10,00	11,36	105,7	38,64	466,0	466,0	66,20

Quadro V.7 - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência
(MC 90 [9])

Viga	Tipo de secção	$\sin \theta$ (-)	$\rho_{w,min}$ (%)	$A_{t,min}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,m\acute{a}x}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)	$S_{t,m\acute{a}x}$ (cm)	$S_{t,ef}$ (cm)	$\phi_{l,min}$ (mm)	$\phi_{l,ef,canto}$ (mm)
B3 [18]	Cheia	0,59	0,16	1,22	12,71	10,16	12,07	12,70	7,94	19,05
B4 [18]	Cheia	0,60	0,16	1,22	13,56	14,01	12,07	9,21	5,76	22,20
B5 [18]	Cheia	0,60	0,16	1,22	13,60	18,47	12,07	6,99	4,37	25,40
B6 [18]	Cheia	0,59	0,16	1,22	12,67	22,57	12,07	5,72	3,57	28,50
B7 [18]	Cheia	0,74	0,16	1,22	18,80	10,16	12,07	12,70	7,94	12,70
B8 [18]	Cheia	0,85	0,16	1,22	25,55	22,57	12,07	5,72	3,57	12,70
B9 [18]	Cheia	0,45	0,16	1,22	7,57	4,66	12,07	15,24	9,53	19,05
C4 [18]	Cheia	0,55	0,16	1,02	8,67	13,11	9,53	9,84	6,15	19,05
C5 [18]	Cheia	0,55	0,16	1,02	8,84	17,66	9,53	7,30	4,56	22,20
C6 [18]	Cheia	0,56	0,16	1,02	9,47	23,90	9,53	5,40	3,37	25,40
G3 [18]	Cheia	0,62	0,16	1,35	14,22	8,29	14,82	15,56	9,72	19,05
G4 [18]	Cheia	0,62	0,16	1,35	15,47	11,29	14,82	11,43	7,14	22,20
G5 [18]	Cheia	0,62	0,16	1,35	14,67	15,05	14,82	8,57	5,36	25,40
G7 [18]	Cheia	0,62	0,16	1,35	17,18	8,83	14,82	14,61	9,13	15,88
G8 [18]	Cheia	0,62	0,16	1,35	15,59	12,31	14,82	10,48	6,55	19,05
I3 [18]	Cheia	0,59	0,21	1,60	17,93	10,16	12,07	12,70	7,94	19,05
I4 [18]	Cheia	0,60	0,21	1,60	19,76	14,01	12,07	9,21	5,76	22,20
I5 [18]	Cheia	0,60	0,21	1,60	20,11	18,47	12,07	6,99	4,37	25,40
I6 [18]	Cheia	0,59	0,21	1,60	18,99	22,57	12,07	5,72	3,57	28,50
J1 [18]	Cheia	0,60	0,12	0,91	6,93	4,66	12,07	15,24	9,53	12,70
J2 [18]	Cheia	0,60	0,12	0,91	7,18	7,21	12,07	9,84	6,15	15,88
J3 [18]	Cheia	0,59	0,12	0,91	6,77	10,16	12,07	12,70	7,94	19,05
J4 [18]	Cheia	0,60	0,12	0,91	8,11	14,01	12,07	9,21	5,76	22,20
K2 [18]	Cheia	0,66	0,16	0,93	12,57	6,78	13,28	10,48	6,55	12,70
K3 [18]	Cheia	0,66	0,16	0,93	12,70	10,42	13,28	12,38	7,74	15,88
K4 [18]	Cheia	0,66	0,16	0,93	11,62	15,05	13,28	8,57	5,36	19,05
M1 [18]	Cheia	0,52	0,16	1,22	10,16	4,76	12,07	14,92	9,33	15,88
M2 [18]	Cheia	0,52	0,16	1,22	10,30	6,78	12,07	10,48	6,55	19,05
M3 [18]	Cheia	0,52	0,16	1,22	9,37	9,23	12,07	13,97	8,73	22,20
M4 [18]	Cheia	0,52	0,16	1,22	9,49	12,31	12,07	10,48	6,55	25,40
M5 [18]	Cheia	0,52	0,16	1,22	9,47	15,63	12,07	8,26	5,16	28,50
M6 [18]	Cheia	0,49	0,16	1,22	9,18	15,63	12,07	8,26	5,16	25,40
N1 [18]	Cheia	0,62	0,16	0,81	9,00	3,51	8,89	9,21	5,76	9,50
N1a [18]	Cheia	0,62	0,16	0,81	8,93	3,51	8,89	9,21	5,76	9,50
N2 [18]	Cheia	0,62	0,16	0,81	9,81	6,36	8,89	5,08	3,18	12,70
N2a [18]	Cheia	0,62	0,16	0,81	9,06	6,21	8,89	11,43	7,14	12,70
N3 [18]	Cheia	0,61	0,09	0,46	8,25	5,09	8,89	6,35	3,97	9,50
N4 [18]	Cheia	0,62	0,12	0,61	8,59	7,99	8,89	8,89	5,56	12,70

Quadro V.7 (cont.) - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (MC 90 [9])

Viga	Tipo de secção	$\sin \theta$ (-)	$\rho_{w,min}$ (%)	$A_{t,min}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,m\acute{a}x}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)	$S_{t,m\acute{a}x}$ (cm)	$S_{t,ef}$ (cm)	$\phi_{l,min}$ (mm)	$\phi_{l,ef,canto}$ (mm)
VB2 [26]	Cheia	0,67	0,14	1,09	9,39	5,84	13,12	5,00	3,13	6,00
VB3 [26]	Cheia	0,67	0,15	1,16	13,14	5,84	13,12	5,00	3,13	6,00
VB4 [26]	Cheia	0,67	0,11	0,85	15,92	5,84	13,12	5,00	3,13	6,00
VM1 [26]	Cheia	0,61	0,15	0,78	8,89	3,63	8,76	3,50	2,19	8,00
VM2 [26]	Cheia	0,61	0,06	0,47	12,76	5,32	13,12	5,30	3,31	12,00
VM3 [26]	Cheia	0,59	0,08	0,83	16,44	7,14	17,50	7,00	4,38	16,00
VQ1 [26]	Cheia	0,61	0,08	0,65	5,99	2,88	12,15	10,00	6,25	6,00
VQ3 [26]	Cheia	0,68	0,08	0,56	7,59	3,05	15,63	10,00	6,25	6,00
VQ9 [26]	Cheia	0,67	0,08	0,48	6,84	2,82	20,67	10,00	6,25	6,00
VS2-VQ2 [26]	Cheia	0,65	0,08	0,62	8,22	3,05	13,12	10,00	6,25	6,00
VS3 [26]	Cheia	0,66	0,08	0,62	8,73	4,55	13,12	6,70	4,19	6,00
VS4-VQ5 [26]	Cheia	0,67	0,08	0,62	8,73	6,10	13,12	5,00	3,13	6,00
VS9 [26]	Cheia	0,65	0,06	0,47	5,80	2,90	13,12	10,00	6,25	6,00
VS10-VB1 [26]	Cheia	0,67	0,06	0,47	6,61	5,80	13,12	5,00	3,13	6,00
VU1 [26]	Cheia	0,77	0,08	0,62	11,62	5,60	13,12	5,00	3,13	6,00
VU2 [26]	Cheia	0,71	0,08	0,62	9,99	5,60	13,12	5,00	3,13	6,00
VU3 [26]	Cheia	0,61	0,08	0,62	7,02	4,18	13,12	6,70	4,19	6,00
VU4 [26]	Cheia	0,54	0,08	0,62	5,37	2,80	13,12	10,00	6,25	6,00
A2 [27]	Cheia	0,61	0,21	1,33	12,33	7,82	9,53	4,13	2,58	12,70
A3 [27]	Cheia	0,55	0,21	1,33	11,12	8,94	9,53	7,94	4,96	15,88
A4 [27]	Cheia	0,54	0,21	1,33	10,95	12,42	9,53	5,72	3,57	19,05
B3 [27]	Cheia	0,62	0,21	1,24	13,31	8,60	10,37	8,26	5,16	15,88
B4 [27]	Cheia	0,62	0,21	1,24	13,03	11,77	10,37	6,03	3,77	19,05
B5UR1 [24]	Cheia	0,62	0,21	1,28	12,55	6,56	9,65	10,80	6,75	12,70
B7UR1 [24]	Cheia	0,62	0,30	1,83	18,13	6,56	9,65	10,80	6,75	12,70
B9UR1 [24]	Cheia	0,62	0,34	2,07	19,92	6,56	9,65	10,80	6,75	12,70
B12UR1 [24]	Cheia	0,62	0,37	2,25	20,75	6,56	9,65	10,80	6,75	12,70
B12UR2 [24]	Cheia	0,63	0,34	2,07	20,82	6,95	9,65	10,20	6,38	12,70
B12UR3 [24]	Cheia	0,60	0,34	2,07	18,53	7,46	9,65	9,50	5,94	12,70
B12UR4 [24]	Cheia	0,58	0,34	2,07	17,98	7,88	9,65	9,00	5,63	12,70
B12UR5 [24]	Cheia	0,62	0,34	2,07	20,44	10,13	9,65	7,00	4,38	15,88
B14UR1 [24]	Cheia	0,62	0,41	2,50	22,36	6,56	9,65	10,80	6,75	12,70
H-06-12 [15]	Cheia	0,52	0,26	2,68	22,67	7,10	16,10	10,00	6,25	12,70
H-07-10 [15]	Cheia	0,52	0,18	1,85	17,23	7,89	16,10	9,00	5,63	19,05
H-07-16 [15]	Cheia	0,46	0,18	1,85	13,86	7,89	16,10	9,00	5,63	19,05
H-12-12 [15]	Cheia	0,65	0,26	2,68	35,78	14,20	16,10	5,00	3,13	12,70
H-12-16 [15]	Cheia	0,58	0,20	2,06	22,21	14,20	16,10	5,00	3,13	19,05
H-14-10 [15]	Cheia	0,66	0,18	1,85	27,50	16,13	16,10	8,00	5,00	19,05

Quadro V.7 (cont.) - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (MC 90 [9])

Viga	Tipo de secção	$\sin \theta$ (-)	$\rho_{w,min}$ (%)	$A_{t,min}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,máx}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)	$S_{t,máx}$ (cm)	$S_{t,ef}$ (cm)	$\phi_{l,min}$ (mm)	$\phi_{l,ef,canto}$ (mm)
H-20-20 [15]	Cheia	0,68	0,20	2,06	24,63	23,45	16,10	5,50	3,44	19,050
N-06-06 [15]	Cheia	0,60	0,11	1,13	14,18	7,10	16,10	10,00	6,25	15,875
N-06-12 [15]	Cheia	0,54	0,11	1,13	12,71	7,10	16,10	10,00	6,25	12,700
N-07-10 [15]	Cheia	0,55	0,09	0,93	9,99	7,89	16,10	9,00	5,63	19,050
N-07-16 [15]	Cheia	0,48	0,09	0,93	8,03	7,89	16,10	9,00	5,63	19,050
N-12-12 [15]	Cheia	0,71	0,11	1,13	20,06	14,20	16,10	5,00	3,13	12,70
N-12-16 [15]	Cheia	0,61	0,09	0,93	12,45	14,20	16,10	5,00	3,13	19,05
N-14-10 [15]	Cheia	0,71	0,09	0,93	15,95	16,13	16,10	8,00	5,00	19,05
N-20-20 [15]	Cheia	0,68	0,09	0,93	13,81	23,45	16,10	5,50	3,44	19,05
NBS-43-44 [13]	Cheia	0,63	0,11	1,13	16,74	5,09	16,10	14,00	8,75	12,70
NBS-82-13 [13]	Cheia	0,30	0,11	1,13	3,33	1,67	16,10	19,00	11,88	9,53
SW4-1 [29]	Cheia	0,56	0,15	0,84	7,85	3,93	12,19	20,00	12,50	10,00
D3 [18]	Vazada	0,55	0,16	1,02	8,03	6,30	13,97	12,70	7,94	19,05
D4 [18]	Vazada	0,67	0,16	1,02	12,30	14,01	13,97	9,21	5,76	22,20
T0 [25]	Vazada	0,54	0,21	1,68	14,24	8,50	21,50	11,00	6,88	16,00
T1 [25]	Vazada	0,74	0,16	1,28	19,12	10,28	22,70	11,00	6,88	12,00
T2 [25]	Vazada	0,68	0,16	1,28	16,61	8,50	21,50	11,00	6,88	12,00
T5 [25]	Vazada	0,89	0,21	1,68	21,93	8,50	26,50	11,00	6,88	8,00
VH1 [26]	Vazada	0,72	0,08	0,64	7,66	2,88	15,20	10,00	6,25	6,00
VH2 [26]	Vazada	1,08	0,08	0,64	13,87	23,04	15,20	5,00	3,13	6,00
A1 [7]	Vazada	0,71	0,14	1,37	15,81	3,11	27,08	9,00	5,63	8,00
A2 [7]	Vazada	0,71	0,14	1,49	15,65	6,25	26,73	8,00	5,00	12,00
A3 [7]	Vazada	0,74	0,14	1,53	16,30	8,32	26,88	9,50	5,94	12,00
A4 [7]	Vazada	0,71	0,15	1,56	16,53	11,29	26,13	7,00	4,38	16,00
A5 [7]	Vazada	0,70	0,15	1,56	16,87	14,13	26,40	8,00	5,00	16,00
B2 [7]	Vazada	0,72	0,18	1,94	21,31	6,67	26,66	7,50	4,69	12,00
B3 [7]	Vazada	0,71	0,20	2,18	22,04	11,29	26,80	7,00	4,38	16,00
B4 [7]	Vazada	0,71	0,20	2,25	24,34	15,07	26,45	7,50	4,69	16,00
B5 [7]	Vazada	0,71	0,20	2,33	24,79	18,83	25,90	6,00	3,75	16,00
C1 [7]	Vazada	0,71	0,23	2,23	23,54	3,11	27,23	9,00	5,63	8,00
C2 [7]	Vazada	0,71	0,23	2,31	22,90	6,25	26,63	8,00	5,00	12,00
C3 [7]	Vazada	0,70	0,23	2,36	21,72	10,53	27,13	7,50	4,69	13,00
C4 [7]	Vazada	0,71	0,23	2,37	23,76	14,13	27,28	8,00	5,00	16,00
C5 [7]	Vazada	0,70	0,24	2,49	24,03	17,38	27,08	6,50	4,06	20,00
C6 [7]	Vazada	0,74	0,22	2,28	23,58	22,60	26,55	5,00	3,13	16,00
A095c [23]	Vazada	0,65	0,16	2,32	26,98	5,88	27,20	13,00	8,13	15,88
A120a [23]	Vazada	0,41	0,11	1,63	7,68	2,63	23,13	17,00	10,63	15,88
B065b [23]	Vazada	0,41	0,15	1,38	6,61	5,88	27,33	13,00	8,13	25,40

Quadro V.7 (cont.) - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (MC 90 [9])

Viga	Tipo de secção	$\sin \theta$ (-)	$\rho_{w,min}$ (%)	$A_{t,min}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,máx}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)	$S_{t,máx}$ (cm)	$S_{t,ef}$ (cm)	$\phi_{l,min}$ (mm)	$\phi_{l,ef,canto}$ (mm)
B080a [23]	Vazada	0,71	0,15	1,68	24,97	12,90	27,53	10,00	6,25	19,05
B110a [23]	Vazada	0,51	0,18	2,63	18,55	3,82	22,88	15,00	9,38	15,88
C065a [23]	Vazada	0,63	0,37	3,15	29,51	5,88	28,90	13,00	8,13	15,88
C100a [23]	Vazada	0,71	0,28	3,56	42,62	12,90	27,55	10,00	6,25	19,05
D075a [23]	Vazada	0,72	0,28	2,44	29,88	12,90	27,80	10,00	6,25	19,05
D090a [23]	Vazada	0,71	0,28	2,94	37,37	12,90	27,58	10,00	6,25	19,05

Quadro V.8 - Características e verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (MC 10 [10])

Viga	Tipo de secção	d_k (cm)	t_{ef} (cm)	$\tan \theta$ (-)	k_c (-)	$A_{t,min}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,máx}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)
B3 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,55	0,50	0,63	3,83	10,16
B4 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,56	0,50	0,66	4,11	14,01
B5 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,56	0,50	0,65	4,15	18,47
B6 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,55	0,50	0,63	3,82	22,57
B7 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,82	0,50	0,61	6,24	10,16
B8 [18]	Cheia	25,40	3,81	1,22	0,50	0,61	9,50	22,57
B9 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,38	0,50	0,65	2,12	4,66
C4 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,50	0,50	0,59	3,07	13,11
C5 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,50	0,50	0,61	3,12	17,66
C6 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,50	0,50	0,64	3,36	23,90
G3 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,59	0,50	0,59	3,86	8,29
G4 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,59	0,50	0,63	4,22	11,29
G5 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,59	0,50	0,60	3,99	15,05
G7 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,59	0,50	0,69	4,75	8,83
G8 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,58	0,50	0,64	4,25	12,31
I3 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,55	0,47	0,81	5,45	10,16
I4 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,56	0,47	0,88	6,00	14,01
I5 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,56	0,47	0,90	6,11	18,47
I6 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,55	0,46	0,86	5,73	22,57
J1 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,56	0,50	0,35	1,97	4,66
J2 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,56	0,50	0,37	2,05	7,21
J3 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,55	0,50	0,35	1,94	10,16
J4 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,56	0,50	0,42	2,33	14,01
K2 [18]	Cheia	15,24	3,81	0,63	0,50	0,65	4,96	6,78
K3 [18]	Cheia	15,24	3,81	0,63	0,50	0,66	4,98	10,42
K4 [18]	Cheia	15,24	3,81	0,64	0,50	0,60	4,56	15,05
M1 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,45	0,50	0,66	2,95	4,76
M2 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,45	0,50	0,66	3,01	6,78
M3 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,45	0,50	0,61	2,69	9,23
M4 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,46	0,50	0,62	2,72	12,31
M5 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,46	0,50	0,61	2,74	15,63
M6 [18]	Cheia	25,40	3,81	0,42	0,50	0,66	2,62	15,63
N1 [18]	Cheia	15,24	2,21	0,59	0,50	0,35	2,40	3,51
N1a [18]	Cheia	15,24	2,21	0,59	0,50	0,35	2,37	3,51
N2 [18]	Cheia	15,24	2,21	0,59	0,50	0,38	2,62	6,36
N2a [18]	Cheia	15,24	2,21	1,04	0,50	0,36	4,92	6,21
N3 [18]	Cheia	15,24	2,21	0,58	0,50	0,33	2,17	5,09
N4 [18]	Cheia	15,24	2,21	0,59	0,50	0,34	2,26	7,99

Quadro V.8 (cont.) - Características e verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (MC 10 [10])

Viga	Tipo de secção	d_k (cm)	t_{ef} (cm)	$\tan \theta$ (-)	k_c (-)	$A_{t,min}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,max}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)
VB2 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,58	0,50	0,29	1,86	5,84
VB3 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,58	0,49	0,37	2,73	5,84
VB4 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,58	0,45	0,43	3,15	5,84
VM1 [26]	Cheia	16,00	2,00	0,58	0,49	0,30	2,17	3,63
VM2 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,57	0,50	0,44	3,12	5,32
VM3 [26]	Cheia	32,00	4,00	0,55	0,49	0,59	3,96	7,14
VQ1 [26]	Cheia	32,40	4,05	0,49	0,50	0,29	1,32	2,88
VQ3 [26]	Cheia	18,60	2,33	0,63	0,50	0,20	1,35	3,05
VQ9 [26]	Cheia	14,00	2,00	0,66	0,50	0,18	1,34	2,82
VS2-VQ2 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,58	0,50	0,28	1,68	3,05
VS3 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,58	0,50	0,28	1,72	4,55
VS4-VQ5 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,58	0,50	0,28	1,68	6,10
VS9 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,58	0,50	0,20	1,18	2,90
VS10-VB1 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,58	0,50	0,21	1,27	5,80
VU1 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,83	0,50	0,28	2,69	5,60
VU2 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,67	0,50	0,28	2,07	5,60
VU3 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,50	0,50	0,26	1,28	4,18
VU4 [26]	Cheia	24,00	3,00	0,41	0,50	0,26	0,92	2,80
A2 [27]	Cheia	25,40	3,20	0,58	0,50	0,56	4,04	7,82
A3 [27]	Cheia	25,40	3,48	0,50	0,49	0,66	3,77	8,94
A4 [27]	Cheia	25,40	3,48	0,49	0,49	0,66	3,71	12,42
B3 [27]	Cheia	17,78	3,48	0,59	0,50	0,66	4,86	8,60
B4 [27]	Cheia	17,78	3,48	0,58	0,50	0,66	4,73	11,77
B5UR1 [24]	Cheia	20,30	3,80	0,58	0,49	0,66	4,86	6,56
B7UR1 [24]	Cheia	20,30	3,80	0,58	0,40	0,89	6,52	6,56
B9UR1 [24]	Cheia	20,30	3,80	0,58	0,38	0,97	7,16	6,56
B12UR1 [24]	Cheia	20,30	3,80	0,58	0,37	1,01	7,49	6,56
B12UR2 [24]	Cheia	20,30	3,80	0,60	0,38	0,98	7,54	6,95
B12UR3 [24]	Cheia	20,30	3,80	0,55	0,39	0,97	6,56	7,46
B12UR4 [24]	Cheia	20,30	3,80	0,52	0,38	1,01	6,29	7,88
B12UR5 [24]	Cheia	20,30	3,80	0,58	0,38	0,99	7,35	10,13
B14UR1 [24]	Cheia	20,30	3,80	0,58	0,35	1,09	8,25	6,56
H-06-12 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,39	0,38	1,23	4,83	7,10
H-07-10 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,46	0,40	0,93	4,67	7,89
H-07-16 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,35	0,40	0,93	3,01	7,89
H-12-12 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,56	0,38	1,23	8,51	14,20
H-12-16 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,47	0,38	0,97	5,22	14,20
H-14-10 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,65	0,40	0,93	8,09	16,13

Quadro V.8 (cont.) - Características e verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (MC 10 [10])

Viga	Tipo de secção	d_k (cm)	t_{ef} (cm)	$\tan \theta$ (-)	k_c (-)	$A_{t,min}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,máx}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)
H-20-20 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,38	0,56	0,90	6,24	23,45
N-06-06 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,52	0,72	4,24	7,10
N-06-12 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,39	0,77	2,90	7,10
N-07-10 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,46	0,61	2,89	7,89
N-07-16 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,35	0,61	1,86	7,89
N-12-12 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,56	0,77	5,12	14,20
N-12-16 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,47	0,61	3,14	14,20
N-14-10 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,65	0,61	5,00	16,13
N-20-20 [15]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,56	0,56	3,75	23,45
NBS-43-44 [13]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,55	0,78	5,07	5,09
NBS-82-13 [13]	Cheia	35,00	5,00	0,50	0,23	0,63	0,89	1,67
SW4-1 [29]	Cheia	15,00	5,00	0,47	0,45	0,79	3,77	3,93
D3 [18]	Vazada	-	6,35	0,44	0,57	1,01	4,22	6,30
D4 [18]	Vazada	-	6,35	0,56	0,55	1,10	6,97	14,01
T0 [25]	Vazada	-	8,00	0,34	0,47	1,69	4,97	8,50
T1 [25]	Vazada	-	8,00	0,51	0,52	1,41	8,11	10,28
T2 [25]	Vazada	-	8,00	0,45	0,52	1,41	6,65	8,50
T5 [25]	Vazada	-	8,00	0,79	0,46	1,14	12,49	8,50
VH1 [26]	Vazada	-	8,00	0,50	0,74	0,65	3,10	2,88
VH2 [26]	Vazada	-	8,00	1,01	0,74	0,65	7,73	23,04
A1 [7]	Vazada	-	9,81	0,49	0,45	1,18	6,50	3,11
A2 [7]	Vazada	-	10,67	0,50	0,46	1,15	6,55	6,25
A3 [7]	Vazada	-	10,90	0,51	0,46	1,13	6,73	8,32
A4 [7]	Vazada	-	10,43	0,50	0,43	1,20	6,81	11,29
A5 [7]	Vazada	-	10,41	0,48	0,44	1,25	6,61	14,13
B2 [7]	Vazada	-	10,80	0,50	0,39	1,46	8,59	6,67
B3 [7]	Vazada	-	10,90	0,50	0,38	1,53	9,01	11,29
B4 [7]	Vazada	-	11,23	0,48	0,37	1,70	9,41	15,07
B5 [7]	Vazada	-	11,67	0,47	0,38	1,72	9,26	18,83
C1 [7]	Vazada	-	9,69	0,49	0,36	1,67	9,57	3,11
C2 [7]	Vazada	-	10,04	0,50	0,35	1,61	9,51	6,25
C3 [7]	Vazada	-	10,25	0,49	0,36	1,57	8,92	10,53
C4 [7]	Vazada	-	10,29	0,48	0,36	1,68	9,40	14,13
C5 [7]	Vazada	-	10,38	0,49	0,35	1,74	10,03	17,38
C6 [7]	Vazada	-	10,38	0,50	0,36	1,53	9,00	22,60
A095c [23]	Vazada	-	14,50	0,54	0,52	2,44	15,45	5,88
A120a [23]	Vazada	-	18,40	0,29	0,58	2,11	4,36	2,63
B065b [23]	Vazada	-	9,20	0,27	0,49	1,36	2,74	5,88

Quadro V.8 (cont.) - Características e verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (MC 10 [10])

Viga	Tipo de secção	d_k (cm)	t_{ef} (cm)	$\tan \theta$ (-)	k_c (-)	$A_{t,min}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,máx}/s$ (cm ² /m)	$A_{t,ef}/s$ (cm ² /m)
B080a [23]	Vazada	-	11,20	0,55	0,46	1,84	12,19	12,90
B110a [23]	Vazada	-	15,50	0,35	0,45	2,60	8,25	3,82
C065a [23]	Vazada	-	8,50	0,46	0,38	2,54	13,01	5,88
C100a [23]	Vazada	-	12,70	0,55	0,36	2,97	20,39	12,90
D075a [23]	Vazada	-	8,70	0,55	0,35	2,08	14,48	12,90
D090a [23]	Vazada	-	10,50	0,55	0,34	2,67	18,58	12,90

Quadro V.9 - Características e verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (EC2 [11])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (—)	v (—)	$\rho_{w,min}$ (%)	$A_{t,min}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,max}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,ef}/s$ (cm^2/m)
B3 [18]	Cheia	0,93	0,55	0,0011	0,83	16,69	10,16
B4 [18]	Cheia	0,93	0,55	0,0012	0,88	17,78	14,01
B5 [18]	Cheia	0,94	0,55	0,0011	0,87	17,83	18,47
B6 [18]	Cheia	0,92	0,55	0,0011	0,84	16,67	22,57
B7 [18]	Cheia	1,38	0,56	0,0011	0,81	22,58	10,16
B8 [18]	Cheia	2,05	0,55	0,0011	0,82	28,41	22,57
B9 [18]	Cheia	0,63	0,55	0,0011	0,87	10,73	4,66
C4 [18]	Cheia	0,94	0,55	0,0010	0,66	13,29	13,11
C5 [18]	Cheia	0,93	0,55	0,0011	0,68	13,57	17,66
C6 [18]	Cheia	0,95	0,55	0,0011	0,71	14,47	23,90
G3 [18]	Cheia	0,93	0,55	0,0010	0,87	17,27	8,29
G4 [18]	Cheia	0,93	0,55	0,0011	0,94	18,79	11,29
G5 [18]	Cheia	0,94	0,55	0,0011	0,89	17,80	15,05
G7 [18]	Cheia	0,93	0,54	0,0012	1,02	20,85	8,83
G8 [18]	Cheia	0,93	0,55	0,0011	0,95	18,95	12,31
I3 [18]	Cheia	0,93	0,51	0,0014	1,08	23,55	10,16
I4 [18]	Cheia	0,93	0,51	0,0015	1,18	25,91	14,01
I5 [18]	Cheia	0,94	0,51	0,0016	1,20	26,36	18,47
I6 [18]	Cheia	0,92	0,51	0,0015	1,15	24,99	22,57
J1 [18]	Cheia	0,93	0,58	0,0006	0,47	9,09	4,66
J2 [18]	Cheia	0,93	0,58	0,0006	0,49	9,42	7,21
J3 [18]	Cheia	0,93	0,58	0,0006	0,47	8,88	10,16
J4 [18]	Cheia	0,93	0,58	0,0007	0,56	10,63	14,01
K2 [18]	Cheia	0,96	0,55	0,0011	0,66	13,97	6,78
K3 [18]	Cheia	0,96	0,55	0,0012	0,68	14,12	10,42
K4 [18]	Cheia	0,97	0,55	0,0011	0,62	12,92	15,05
M1 [18]	Cheia	0,76	0,55	0,0011	0,87	13,93	4,76
M2 [18]	Cheia	0,76	0,55	0,0012	0,88	14,12	6,78
M3 [18]	Cheia	0,76	0,55	0,0011	0,82	12,84	9,23
M4 [18]	Cheia	0,76	0,56	0,0011	0,82	12,99	12,31
M5 [18]	Cheia	0,76	0,55	0,0011	0,81	12,96	15,63
M6 [18]	Cheia	0,70	0,55	0,0012	0,89	12,76	15,63
N1 [18]	Cheia	0,94	0,55	0,0011	0,53	10,91	3,51
N1a [18]	Cheia	0,94	0,55	0,0011	0,53	10,84	3,51
N2 [18]	Cheia	0,94	0,55	0,0011	0,58	11,91	6,36
N2a [18]	Cheia	1,66	0,55	0,0011	0,55	17,50	6,21
N3 [18]	Cheia	0,92	0,55	0,0010	0,51	10,03	5,09
N4 [18]	Cheia	0,93	0,55	0,0010	0,52	10,44	7,99

Quadro V.9 (cont.) - Características e verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (EC2 [11])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (—)	v (—)	$\rho_{w,min}$ (%)	$A_{t,min}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,máx}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,ef}/s$ (cm^2/m)
VB2 [26]	Cheia	0,94	0,56	0,0006	0,49	9,82	5,84
VB3 [26]	Cheia	0,94	0,53	0,0008	0,64	13,74	5,84
VB4 [26]	Cheia	0,94	0,50	0,0010	0,74	16,65	5,84
VM1 [26]	Cheia	0,92	0,53	0,0010	0,52	11,04	3,63
VM2 [26]	Cheia	0,92	0,53	0,0010	0,76	15,85	5,32
VM3 [26]	Cheia	0,88	0,52	0,0010	1,02	20,58	7,14
VQ1 [26]	Cheia	0,90	0,57	0,0005	0,39	7,09	2,88
VQ3 [26]	Cheia	0,95	0,58	0,0006	0,40	7,80	3,05
VQ9 [26]	Cheia	0,96	0,57	0,0006	0,37	7,22	2,82
VS2-VQ2 [26]	Cheia	0,94	0,57	0,0006	0,48	9,13	3,05
VS3 [26]	Cheia	0,93	0,57	0,0006	0,49	9,32	4,55
VS4-VQ5 [26]	Cheia	0,94	0,57	0,0006	0,48	9,13	6,10
VS9 [26]	Cheia	0,94	0,58	0,0004	0,34	6,44	2,90
VS10-VB1 [26]	Cheia	0,94	0,57	0,0005	0,36	6,92	5,80
VU1 [26]	Cheia	1,32	0,57	0,0006	0,48	12,49	5,60
VU2 [26]	Cheia	1,08	0,57	0,0006	0,48	10,57	5,60
VU3 [26]	Cheia	0,81	0,57	0,0006	0,46	7,39	4,18
VU4 [26]	Cheia	0,66	0,57	0,0006	0,46	5,69	2,80
A2 [27]	Cheia	1,07	0,53	0,0012	0,73	18,05	7,82
A3 [27]	Cheia	0,92	0,52	0,0013	0,81	17,13	8,94
A4 [27]	Cheia	0,91	0,53	0,0013	0,81	16,92	12,42
B3 [27]	Cheia	0,94	0,53	0,0013	0,74	16,12	8,60
B4 [27]	Cheia	0,93	0,53	0,0013	0,75	15,83	11,77
B5UR1 [24]	Cheia	0,99	0,52	0,0012	0,71	16,24	6,56
B7UR1 [24]	Cheia	0,99	0,46	0,0016	0,95	23,46	6,56
B9UR1 [24]	Cheia	0,99	0,44	0,0017	1,03	25,77	6,56
B12UR1 [24]	Cheia	0,99	0,43	0,0018	1,08	26,85	6,56
B12UR2 [24]	Cheia	1,02	0,44	0,0017	1,04	26,76	6,95
B12UR3 [24]	Cheia	0,94	0,44	0,0017	1,03	24,28	7,46
B12UR4 [24]	Cheia	0,89	0,44	0,0018	1,08	23,85	7,88
B12UR5 [24]	Cheia	0,99	0,44	0,0017	1,06	26,46	10,13
B14UR1 [24]	Cheia	0,99	0,39	0,0019	1,17	28,93	6,56
H-06-12 [15]	Cheia	0,67	0,43	0,0016	1,69	26,07	7,10
H-07-10 [15]	Cheia	0,77	0,46	0,0012	1,28	23,95	7,89
H-07-16 [15]	Cheia	0,60	0,46	0,0012	1,28	16,89	7,89
H-12-12 [15]	Cheia	0,94	0,43	0,0016	1,69	39,89	14,20
H-12-16 [15]	Cheia	0,80	0,43	0,0013	1,33	26,24	14,20
H-14-10 [15]	Cheia	1,10	0,46	0,0012	1,28	35,21	16,13

Quadro V.9 (cont.) - Características e verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (EC2 [11])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	v (-)	$\rho_{w,min}$ (%)	$A_{t,min}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,máx}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,ef}/s$ (cm^2/m)
H-20-20 [15]	Cheia	0,94	0,43	0,0012	1,23	29,22	23,45
N-06-06 [15]	Cheia	0,87	0,53	0,0010	0,98	19,18	7,10
N-06-12 [15]	Cheia	0,67	0,53	0,0010	1,05	14,61	7,10
N-07-10 [15]	Cheia	0,77	0,54	0,0008	0,83	13,89	7,89
N-07-16 [15]	Cheia	0,60	0,54	0,0008	0,83	9,80	7,89
N-12-12 [15]	Cheia	0,94	0,53	0,0010	1,05	22,36	14,20
N-12-16 [15]	Cheia	0,80	0,53	0,0008	0,83	14,71	14,20
N-14-10 [15]	Cheia	1,10	0,54	0,0008	0,83	20,42	16,13
N-20-20 [15]	Cheia	0,94	0,53	0,0007	0,77	16,38	23,45
NBS-43-44 [13]	Cheia	0,93	0,54	0,0010	1,07	22,33	5,09
NBS-82-13 [13]	Cheia	0,39	0,54	0,0008	0,87	5,13	1,67
SW4-1 [29]	Cheia	0,70	0,51	0,0010	0,59	9,11	3,93
D3 [18]	Vazada	0,79	0,55	0,00	0,81	11,15	6,30
D4 [18]	Vazada	1,01	0,55	0,00	0,88	16,15	14,01
T0 [25]	Vazada	0,67	0,51	0,00	1,76	16,69	8,50
T1 [25]	Vazada	1,02	0,53	0,00	1,46	21,48	10,28
T2 [25]	Vazada	0,90	0,53	0,00	1,46	18,89	8,50
T5 [25]	Vazada	1,34	0,51	0,00	1,26	23,19	8,50
VH1 [26]	Vazada	1,01	0,58	0,00	0,44	8,93	2,88
VH2 [26]	Vazada	2,01	0,58	0,00	0,44	14,23	23,04
A1 [7]	Vazada	0,97	0,50	0,00	1,20	18,22	3,11
A2 [7]	Vazada	1,00	0,51	0,00	1,08	18,27	6,25
A3 [7]	Vazada	1,02	0,51	0,00	1,04	18,33	8,32
A4 [7]	Vazada	0,99	0,49	0,00	1,15	19,30	11,29
A5 [7]	Vazada	0,95	0,49	0,00	1,20	19,19	14,13
B2 [7]	Vazada	1,00	0,45	0,00	1,36	24,58	6,67
B3 [7]	Vazada	1,00	0,43	0,00	1,40	25,73	11,29
B4 [7]	Vazada	0,96	0,43	0,00	1,51	27,32	15,07
B5 [7]	Vazada	0,95	0,44	0,00	1,48	27,39	18,83
C1 [7]	Vazada	0,97	0,40	0,00	1,72	27,13	3,11
C2 [7]	Vazada	0,99	0,39	0,00	1,61	26,62	6,25
C3 [7]	Vazada	0,97	0,40	0,00	1,53	25,56	10,53
C4 [7]	Vazada	0,97	0,40	0,00	1,63	27,00	14,13
C5 [7]	Vazada	0,98	0,39	0,00	1,68	28,20	17,38
C6 [7]	Vazada	1,00	0,41	0,00	1,48	25,60	22,60
A095c [23]	Vazada	0,99	0,53	0,00	1,64	36,16	5,88
A120a [23]	Vazada	0,49	0,55	0,00	1,13	9,51	2,63
B065b [23]	Vazada	0,50	0,53	0,00	1,46	8,43	5,88

Quadro V.9 (cont.) - Características e verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (EC2 [11])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (—)	v (—)	$\rho_{w,min}$ (%)	$A_{t,min}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,máx}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,ef}/s$ (cm^2/m)
B080a [23]	Vazada	1,00	0,51	0,00	1,61	29,12	12,90
B110a [23]	Vazada	0,59	0,50	0,00	1,64	20,29	3,82
C065a [23]	Vazada	0,82	0,43	0,00	3,02	34,47	5,88
C100a [23]	Vazada	1,00	0,40	0,00	2,30	49,64	12,90
D075a [23]	Vazada	1,01	0,39	0,00	2,36	34,64	12,90
D090a [23]	Vazada	1,00	0,37	0,00	2,51	43,58	12,90

Quadro V.10 - Características para a verificação das vigas de referência
(CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	t_{ef} (cm)	A_{0k} (cm ²)	p_k (cm)	A_0 (cm ²)	f_c (MPa)	f_{ty} (MPa)	$\tan \theta$ (—)
B3 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	28,1	327,6	0,67
B4 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	29,2	320,0	0,67
B5 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	30,6	332,4	0,67
B6 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	28,8	331,7	0,66
B7 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	26,0	320,0	0,99
B8 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	26,8	322,1	1,48
B9 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	28,8	319,3	0,45
C4 [1]	Cheia	6,35	466,1	86,4	396,2	27,2	336,6	0,67
C5 [1]	Cheia	6,35	466,1	86,4	396,2	27,2	328,3	0,67
C6 [1]	Cheia	6,35	466,1	86,4	396,2	27,6	315,9	0,67
G3 [1]	Cheia	8,47	1014,5	137,2	862,3	26,8	338,6	0,67
G4 [1]	Cheia	8,47	1014,5	137,2	862,3	28,3	325,5	0,67
G5 [1]	Cheia	8,47	1014,5	137,2	862,3	26,9	331,0	0,67
G7 [1]	Cheia	8,47	1014,5	137,2	862,3	31,0	319,3	0,67
G8 [1]	Cheia	8,47	1014,5	137,2	862,3	28,3	322,1	0,67
I3 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	44,8	343,4	0,67
I4 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	45,0	315,2	0,67
I5 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	45,0	310,3	0,67
I6 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	45,8	325,5	0,66
J1 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	14,3	327,6	0,67
J2 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	14,6	320,0	0,67
J3 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	16,9	388,6	0,67
J4 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	16,8	324,1	0,67
K2 [1]	Cheia	5,83	522,6	114,3	444,2	30,6	335,9	0,67
K3 [1]	Cheia	5,83	522,6	114,3	444,2	29,0	315,9	0,67
K4 [1]	Cheia	5,83	522,6	114,3	444,2	28,6	344,1	0,67
M1 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	29,9	326,2	0,55
M2 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	30,6	329,0	0,55
M3 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	26,8	322,1	0,55
M4 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	26,6	318,6	0,55
M5 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	28,0	335,2	0,55
M6 [1]	Cheia	7,62	740,3	111,8	629,3	29,4	317,9	0,51
N1 [1]	Cheia	5,08	368,4	82,6	313,1	29,5	352,4	0,68
N1a [1]	Cheia	5,08	368,4	82,6	313,1	28,7	346,2	0,68
N2 [1]	Cheia	5,08	368,4	82,6	313,1	30,4	331,0	0,68
N2a [1]	Cheia	5,08	368,4	82,6	313,1	28,4	333,1	1,20
N3 [1]	Cheia	5,08	368,4	82,6	313,1	27,3	351,7	0,67
N4 [1]	Cheia	5,08	368,4	82,6	313,1	27,3	340,9	0,67

Quadro V.10 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência
(CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	t_{ef} (cm)	A_{0k} (cm ²)	p_k (cm)	A_0 (cm ²)	f_c (MPa)	f_{ty} (MPa)	$\tan \theta$ (—)
VB2 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	26,4	541,4	0,69
VB3 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	39,1	541,4	0,69
VB4 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	49,8	541,4	0,69
VM1 [2]	Cheia	5,18	408,8	85,2	347,5	39,1	442,4	0,68
VM2 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	36,1	431,6	0,68
VM3 [2]	Cheia	10,36	1649,3	171,0	1401,9	40,0	461,0	0,65
VQ1 [2]	Cheia	8,10	924,2	121,6	785,5	19,0	557,1	0,68
VQ3 [2]	Cheia	7,04	929,6	145,2	790,2	17,6	432,6	0,68
VQ9 [2]	Cheia	5,96	943,2	181,2	801,7	19,5	441,4	0,67
VS2-VQ2 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	19,0	432,6	0,69
VS3 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	19,5	432,6	0,69
VS4-VQ5 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	19,0	432,6	0,69
VS9 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	17,6	570,9	0,69
VS10-VB1 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	19,0	570,9	0,69
VU1 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	19,5	441,4	0,98
VU2 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	19,5	441,4	0,80
VU3 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	18,5	441,4	0,60
VU4 [2]	Cheia	7,76	924,0	128,0	785,4	18,5	441,4	0,49
A2 [3]	Cheia	6,35	492,8	88,8	418,9	38,2	380,0	0,78
A3 [3]	Cheia	6,35	480,5	87,7	408,4	39,4	352,4	0,66
A4 [3]	Cheia	6,35	480,5	87,7	408,4	39,2	351,0	0,66
B3 [3]	Cheia	5,93	458,7	92,8	389,9	38,6	352,4	0,67
B4 [3]	Cheia	5,93	458,7	92,8	389,9	38,5	351,0	0,66
B5UR1 [5]	Cheia	6,09	440,6	86,4	374,5	39,6	386,0	0,70
B7UR1 [5]	Cheia	6,09	440,6	86,4	374,5	64,6	386,0	0,70
B9UR1 [5]	Cheia	6,09	440,6	86,4	374,5	75,0	386,0	0,70
B12UR1 [5]	Cheia	6,09	440,6	86,4	374,5	80,6	386,0	0,70
B12UR2 [5]	Cheia	6,09	440,6	86,4	374,5	76,2	386,0	0,72
B12UR3 [5]	Cheia	6,09	440,6	86,4	374,5	72,9	379,5	0,66
B12UR4 [5]	Cheia	6,09	440,6	86,4	374,5	75,9	373,0	0,63
B12UR5 [5]	Cheia	6,09	440,6	86,4	374,5	76,7	380,0	0,70
B14UR1 [5]	Cheia	6,09	440,6	86,4	374,5	93,9	386,0	0,70
H-06-12 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	78,5	410,0	0,48
H-07-10 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	68,4	500,0	0,56
H-07-16 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	68,4	500,0	0,43
H-12-12 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	78,5	410,0	0,68
H-12-16 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	78,5	520,0	0,58
H-14-10 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	68,4	500,0	0,80

Quadro V.10 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência
(CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de seção	t_{ef} (cm)	A_{ok} (cm ²)	p_k (cm)	A_0 (cm ²)	f_c (MPa)	f_{ty} (MPa)	$\tan \theta$ (-)
H-20-20 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	78,5	560,0	0,68
N-06-06 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	35,5	440,0	0,63
N-06-12 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	35,5	410,0	0,48
N-07-10 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	33,5	500,0	0,56
N-07-16 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	33,5	500,0	0,43
N-12-12 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	35,5	410,0	0,68
N-12-16 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	35,5	520,0	0,58
N-14-10 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	33,5	500,0	0,80
N-20-20 [6]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	35,5	560,0	0,68
NBS-43-44 [7]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	35,0	400,0	0,67
NBS-82-13 [7]	Cheia	10,29	1350,0	150,0	1147,5	35,0	493,0	0,28
SW4-1 [8]	Cheia	5,63	400,0	100,0	340,0	44,2	459,0	0,47
D3 [1]	Oca	6,35	740,3	111,8	629,3	28,4	341,4	0,53
D4 [1]	Oca	6,35	740,3	111,8	629,3	30,6	330,3	0,67
T0 [9]	Oca	8,00	1849,0	172,0	1571,7	45,1	345,2	0,45
T1 [9]	Oca	8,00	2061,2	181,6	1752,0	35,3	356,7	0,68
T2 [9]	Oca	8,00	1849,0	172,0	1571,7	35,3	357,0	0,60
T5 [9]	Oca	8,00	2409,0	212,0	2047,7	47,1	528,6	0,90
VH1 [2]	Oca	8,00	924,2	121,6	785,5	17,2	447,3	0,68
VH2 [2]	Oca	8,00	924,2	121,6	785,5	17,2	447,3	1,35
A1 [10]	Oca	9,81	2932,0	216,6	2492,2	48,4	636,7	0,65
A2 [10]	Oca	10,67	2856,8	213,8	2428,3	47,3	695,9	0,67
A3 [10]	Oca	10,90	2889,0	215,0	2455,7	46,2	714,8	0,69
A4 [10]	Oca	10,43	2730,0	209,0	2320,5	54,8	714,8	0,66
A5 [10]	Oca	10,41	2787,8	211,2	2369,7	53,1	672,4	0,64
B2 [10]	Oca	10,80	2843,6	213,3	2417,0	69,8	695,9	0,67
B3 [10]	Oca	10,90	2873,0	214,4	2442,0	77,8	714,8	0,67
B4 [10]	Oca	11,23	2798,0	211,6	2378,3	79,8	672,4	0,64
B5 [10]	Oca	11,67	2683,2	207,2	2280,8	76,4	672,4	0,64
C1 [10]	Oca	9,69	2964,6	217,8	2519,9	91,7	636,7	0,65
C2 [10]	Oca	10,04	2835,6	213,0	2410,2	94,8	695,9	0,67
C3 [10]	Oca	10,25	2943,0	217,0	2501,6	91,6	714,8	0,65
C4 [10]	Oca	10,29	2975,7	218,2	2529,3	91,4	672,4	0,65
C5 [10]	Oca	10,38	2932,2	216,6	2492,4	96,7	672,4	0,65
C6 [10]	Oca	10,38	2819,6	212,4	2396,6	87,5	723,9	0,67
A095c [11]	Oca	14,50	2844,9	217,6	2418,1	35,1	371,0	0,66
A120a [11]	Oca	18,40	2912,8	220,2	2475,9	27,6	464,0	0,36
B065b [11]	Oca	9,20	2879,5	218,6	2447,6	39,2	452,0	0,34

Quadro V.10 (cont.) - Características para a verificação das vigas de referência
(CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	t_{ef} (cm)	A_{0k} (cm ²)	p_k (cm)	A_0 (cm ²)	f_c (MPa)	f_{ty} (MPa)	$\tan \theta$ (—)
B080a [11]	Oca	11,20	2908,4	220,2	2472,1	46,5	454,0	0,67
B110a [11]	Oca	15,50	2847,0	217,6	2420,0	48,1	453,0	0,43
C065a [11]	Oca	8,50	3136,4	231,2	2665,9	78,8	338,0	0,55
C100a [11]	Oca	12,70	2910,6	220,4	2474,0	90,6	466,0	0,67
D075a [11]	Oca	8,70	2952,1	222,4	2509,3	94,9	469,0	0,67
D090a [11]	Oca	10,50	2919,4	220,6	2481,5	105,7	466,0	0,67

Quadro V.11 - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência
(CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	$A_{t,min}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,máx}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,ef}/s$ (cm^2/m)	$S_{t,máx}$ (cm)	$S_{t,ef}$ (cm)
B3 [18]	Cheia	2,46	9,41	10,16	30,00	12,70
B4 [18]	Cheia	2,57	10,06	14,01	30,00	9,21
B5 [18]	Cheia	2,53	10,15	18,47	30,00	6,99
B6 [18]	Cheia	2,47	9,43	22,57	30,00	5,72
B7 [18]	Cheia	2,43	13,23	10,16	30,00	12,70
B8 [18]	Cheia	2,45	20,17	22,57	30,00	5,72
B9 [18]	Cheia	2,56	6,71	4,66	30,00	15,24
C4 [18]	Cheia	2,36	7,21	13,11	30,00	9,84
C5 [18]	Cheia	2,42	7,37	17,66	30,00	7,30
C6 [18]	Cheia	2,53	7,86	23,90	30,00	5,40
G3 [18]	Cheia	2,33	9,72	8,29	30,00	15,56
G4 [18]	Cheia	2,49	10,65	11,29	30,00	11,43
G5 [18]	Cheia	2,39	10,02	15,05	30,00	8,57
G7 [18]	Cheia	2,66	11,94	8,83	30,00	14,61
G8 [18]	Cheia	2,52	10,74	12,31	30,00	10,48
I3 [18]	Cheia	2,97	14,31	10,16	30,00	12,70
I4 [18]	Cheia	3,24	15,75	14,01	30,00	9,21
I5 [18]	Cheia	3,30	16,03	18,47	30,00	6,99
I6 [18]	Cheia	3,17	15,27	22,57	30,00	5,72
J1 [18]	Cheia	1,76	4,83	4,66	30,00	15,24
J2 [18]	Cheia	1,82	5,01	7,21	30,00	9,84
J3 [18]	Cheia	1,61	4,77	10,16	30,00	12,70
J4 [18]	Cheia	1,92	5,71	14,01	30,00	9,21
K2 [18]	Cheia	1,51	6,91	6,78	30,00	10,48
K3 [18]	Cheia	1,56	6,94	10,42	30,00	12,38
K4 [18]	Cheia	1,42	6,33	15,05	30,00	8,57
M1 [18]	Cheia	2,55	8,19	4,76	30,00	14,92
M2 [18]	Cheia	2,56	8,33	6,78	30,00	10,48
M3 [18]	Cheia	2,45	7,45	9,23	30,00	13,97
M4 [18]	Cheia	2,46	7,52	12,31	30,00	10,48
M5 [18]	Cheia	2,41	7,54	15,63	30,00	8,26
M6 [18]	Cheia	2,60	7,67	15,63	30,00	8,26
N1 [18]	Cheia	1,41	6,25	3,51	30,00	9,21
N1a [18]	Cheia	1,41	6,19	3,51	30,00	9,21
N2 [18]	Cheia	1,52	6,85	6,36	30,00	5,08
N2a [18]	Cheia	1,46	11,25	6,21	30,00	11,43
N3 [18]	Cheia	1,36	5,70	5,09	30,00	6,35
N4 [18]	Cheia	1,40	5,93	7,99	30,00	8,89

Quadro V.11 (cont.) - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	$A_{t,min}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,máx}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,ef}/s$ (cm^2/m)	$S_{t,máx}$ (cm)	$S_{t,ef}$ (cm)
VB2 [26]	Cheia	2,51	6,02	5,84	30,00	5,00
VB3 [26]	Cheia	3,05	8,92	5,84	30,00	5,00
VB4 [26]	Cheia	3,44	11,36	5,84	30,00	5,00
VM1 [26]	Cheia	2,49	7,13	3,63	30,00	3,50
VM2 [26]	Cheia	3,68	10,17	5,32	30,00	5,30
VM3 [26]	Cheia	4,83	13,53	7,14	30,00	7,00
VQ1 [26]	Cheia	1,52	4,32	2,88	30,00	10,00
VQ3 [26]	Cheia	3,38	4,40	3,05	30,00	10,00
VQ9 [26]	Cheia	4,84	3,82	2,82	30,00	10,00
VS2-VQ2 [26]	Cheia	2,66	5,43	3,05	30,00	10,00
VS3 [26]	Cheia	2,70	5,56	4,55	30,00	6,70
VS4-VQ5 [26]	Cheia	2,66	5,43	6,10	30,00	5,00
VS9 [26]	Cheia	1,94	3,81	2,90	30,00	10,00
VS10-VB1 [26]	Cheia	2,02	4,11	5,80	30,00	5,00
VU1 [26]	Cheia	2,64	7,72	5,60	30,00	5,00
VU2 [26]	Cheia	2,64	6,30	5,60	30,00	5,00
VU3 [26]	Cheia	2,57	4,47	4,18	30,00	6,70
VU4 [26]	Cheia	2,57	3,66	2,80	30,00	10,00
A2 [27]	Cheia	2,48	10,73	7,82	30,00	4,13
A3 [27]	Cheia	2,71	10,05	8,94	30,00	7,94
A4 [27]	Cheia	2,72	9,93	12,42	30,00	5,72
B3 [27]	Cheia	1,88	8,97	8,60	30,00	8,26
B4 [27]	Cheia	1,89	8,81	11,77	30,00	6,03
B5UR1 [24]	Cheia	1,99	9,09	6,56	30,00	10,80
B7UR1 [24]	Cheia	2,54	14,83	6,56	30,00	10,80
B9UR1 [24]	Cheia	2,73	17,21	6,56	30,00	10,80
B12UR1 [24]	Cheia	2,83	18,50	6,56	30,00	10,80
B12UR2 [24]	Cheia	2,75	18,00	6,95	30,00	10,20
B12UR3 [24]	Cheia	2,74	16,07	7,46	30,00	9,50
B12UR4 [24]	Cheia	2,84	16,12	7,88	30,00	9,00
B12UR5 [24]	Cheia	2,81	17,84	10,13	30,00	7,00
B14UR1 [24]	Cheia	3,06	21,55	6,56	30,00	10,80
H-06-12 [15]	Cheia	4,54	20,51	7,10	30,00	10,00
H-07-10 [15]	Cheia	3,47	17,01	7,89	30,00	9,00
H-07-16 [15]	Cheia	3,47	13,17	7,89	30,00	9,00
H-12-12 [15]	Cheia	4,54	29,01	14,20	30,00	5,00
H-12-16 [15]	Cheia	3,58	19,50	14,20	30,00	5,00
H-14-10 [15]	Cheia	3,47	24,32	16,13	30,00	8,00

Quadro V.11 (cont.) - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	$A_{t,min}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,máx}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,ef}/s$ (cm^2/m)	$S_{t,máx}$ (cm)	$S_{t,ef}$ (cm)
H-20-20 [15]	Cheia	3,32	21,25	23,45	30,00	5,50
N-06-06 [15]	Cheia	2,84	11,34	7,10	30,00	10,00
N-06-12 [15]	Cheia	3,05	9,28	7,10	30,00	10,00
N-07-10 [15]	Cheia	2,43	8,33	7,89	30,00	9,00
N-07-16 [15]	Cheia	2,43	6,45	7,89	30,00	9,00
N-12-12 [15]	Cheia	3,05	13,12	14,20	30,00	5,00
N-12-16 [15]	Cheia	2,41	8,82	14,20	30,00	5,00
N-14-10 [15]	Cheia	2,43	11,91	16,13	30,00	8,00
N-20-20 [15]	Cheia	2,23	9,61	23,45	30,00	5,50
NBS-43-44 [13]	Cheia	3,11	13,08	5,09	30,00	14,00
NBS-82-13 [13]	Cheia	2,52	4,44	1,67	30,00	19,00
SW4-1 [29]	Cheia	1,30	4,51	3,93	30,00	20,00
D3 [18]	Vazada	2,38	6,90	6,30	30,00	12,70
D4 [18]	Vazada	2,55	9,81	14,01	30,00	9,21
T0 [25]	Vazada	5,84	11,68	8,50	30,00	11,00
T1 [25]	Vazada	5,00	13,32	10,28	30,00	11,00
T2 [25]	Vazada	4,99	11,78	8,50	30,00	11,00
T5 [25]	Vazada	6,23	15,85	8,50	30,00	11,00
VH1 [26]	Vazada	1,80	4,87	2,88	30,00	10,00
VH2 [26]	Vazada	1,80	9,73	23,04	30,00	5,00
A1 [7]	Vazada	3,94	12,01	3,11	30,00	9,00
A2 [7]	Vazada	3,56	11,98	6,25	30,00	8,00
A3 [7]	Vazada	3,42	11,95	8,32	30,00	9,50
A4 [7]	Vazada	3,73	13,12	11,29	30,00	7,00
A5 [7]	Vazada	3,90	12,95	14,13	30,00	8,00
B2 [7]	Vazada	4,32	18,03	6,67	30,00	7,50
B3 [7]	Vazada	4,44	19,73	11,29	30,00	7,00
B4 [7]	Vazada	4,78	21,19	15,07	30,00	7,50
B5 [7]	Vazada	4,68	20,86	18,83	30,00	6,00
C1 [7]	Vazada	5,42	22,54	3,11	30,00	9,00
C2 [7]	Vazada	5,04	22,53	6,25	30,00	8,00
C3 [7]	Vazada	4,82	21,21	10,53	30,00	7,50
C4 [7]	Vazada	5,12	22,39	14,13	30,00	8,00
C5 [7]	Vazada	5,26	24,15	17,38	30,00	6,50
C6 [7]	Vazada	4,65	20,74	22,60	30,00	5,00
A095c [23]	Vazada	4,76	20,21	5,88	30,00	13,00
A120a [23]	Vazada	3,41	7,01	2,63	30,00	17,00
B065b [23]	Vazada	4,18	6,64	5,88	30,00	13,00

Quadro V.11 (cont.) - Verificação das disposições regulamentares das vigas de referência (CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	$A_{t,min}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,máx}/s$ (cm^2/m)	$A_{t,ef}/s$ (cm^2/m)	$s_{t,máx}$ (cm)	$s_{t,ef}$ (cm)
B080a [23]	Vazada	4,51	19,02	12,90	30,00	10,00
B110a [23]	Vazada	4,57	14,85	3,82	30,00	15,00
C065a [23]	Vazada	7,80	27,07	5,88	30,00	13,00
C100a [23]	Vazada	6,12	40,95	12,90	30,00	10,00
D075a [23]	Vazada	6,21	29,33	12,90	30,00	10,00
D090a [23]	Vazada	6,63	39,52	12,90	30,00	10,00

Anexo VI. Análise da Previsão da Resistência à Torção

Quadro VI.1 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	T_c (in - lb)	α_t (-)	T_s (in - lb)	$T_{r,calc}$ (in - lb)	(kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B3 [18]	Cheia	76555,91	1,18	258103,06	334658,97	37,83	37,48	0,991
B4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	78045,59	1,18	312182,35	390227,93	44,11	47,30	1,072
B5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	79870,25	1,18	319481,02	399351,27	45,14	56,11	1,243
B6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	77584,06	1,18	310336,24	387920,30	43,85	61,64	1,406
B7 [18]	Cheia	73680,39	1,18	252126,10	325806,49	36,83	26,87	0,730
B8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	74748,10	1,18	298992,42	373740,52	42,24	32,51	0,770
B9 [18]	Cheia	77584,06	1,18	115389,88	192973,94	21,81	29,80	1,366
C4 [18]	Cheia	50215,15	0,99	180103,33	230318,48	26,03	25,29	0,971
C5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	50278,87	0,99	201115,48	251394,35	28,42	29,69	1,045
C6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	50596,25	0,99	202385,01	252981,26	28,59	34,21	1,196
G3 [18]	Cheia	99792,55	1,38	347374,66	447167,22	50,54	49,56	0,981
G4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	102450,24	1,38	409800,95	512251,19	57,90	64,80	1,119
G5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	99920,80	1,38	399683,20	499604,00	56,47	71,91	1,273
G7 [18]	Cheia	107212,78	1,38	348938,57	456151,34	51,56	52,61	1,020
G8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	102575,16	1,38	410300,65	512875,81	57,97	73,38	1,266
I3 [18]	Cheia	96673,05	1,18	270600,64	367273,69	41,51	45,61	1,099
I4 [18]	Cheia	96896,34	1,18	342494,70	439391,04	49,66	58,02	1,168
I5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	96969,58	1,18	387878,31	484847,89	54,80	70,67	1,290
I6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	97783,32	1,18	391133,29	488916,62	55,26	76,65	1,387
J1 [18]	Cheia	54728,75	1,18	118380,60	173109,35	19,57	21,45	1,096
J2 [18]	Cheia	55122,21	1,18	179045,20	234167,40	26,47	29,13	1,101
J3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	59397,76	1,18	237591,03	296988,79	33,57	35,22	1,049
J4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	59154,71	1,18	236618,82	295773,53	33,43	40,64	1,216
K2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	37421,46	1,50	149685,86	187107,32	21,15	23,71	1,121
K3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	36438,84	1,50	145755,36	182194,20	20,59	28,45	1,382
K4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	36178,75	1,50	144714,98	180893,73	20,45	35,00	1,712
M1 [18]	Cheia	78963,19	1,18	120386,37	199349,56	22,53	30,37	1,348
M2 [18]	Cheia	79870,25	1,18	172907,09	252777,34	28,57	40,53	1,419
M3 [18]	Cheia	74748,10	1,18	230687,50	305435,60	34,52	43,80	1,269
M4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	74458,43	1,18	297833,71	372292,14	42,08	49,56	1,178
M5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	76461,76	1,18	305847,02	382308,78	43,21	55,65	1,288
M6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	78322,00	1,18	313287,99	391609,98	44,26	60,06	1,357
N1 [18]	Cheia	22609,65	1,38	55441,72	78051,37	8,82	9,09	1,030
N1a [18]	Cheia	22290,66	1,38	54465,23	76755,90	8,68	8,99	1,036
N2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	22950,62	1,38	91802,50	114753,12	12,97	14,45	1,114

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.1 (cont.) - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	T_c (in - lb)	α_t (-)	T_s (in - lb)	$T_{r,calc}$ (in - lb)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
N2a [18] ⁽¹⁾	Cheia	22183,19	1,38	88732,74	110915,93	12,54	13,21	1,054
N3 [18]	Cheia	21747,96	1,38	80237,45	101985,41	11,53	12,19	1,057
N4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	21747,96	1,38	86991,85	108739,81	12,29	15,69	1,277
VB2 [26]	Cheia	140343,21	0,83	215316,51	355659,72	40,20	42,11	1,048
VB3 [26]	Cheia	170796,05	0,83	215316,51	386112,56	43,64	46,40	1,063
VB4 [26]	Cheia	192754,31	0,83	215316,51	408070,82	46,12	48,54	1,052
VM1 [26]	Cheia	50836,53	0,83	48313,28	99149,81	11,21	13,89	1,239
VM2 [26]	Cheia	164113,02	0,83	156369,46	320482,48	36,22	39,17	1,081
VM3 [26]	Cheia	409948,23	0,83	400292,50	810240,73	91,58	100,80	1,101
VQ1 [26]	Cheia	87153,47	0,99	129899,07	217052,54	24,53	21,11	0,860
VQ3 [26]	Cheia	154311,43	0,76	82240,18	236551,62	26,74	19,98	0,747
VQ9 [26]	Cheia	236095,80	0,71	73797,20	309893,00	35,03	21,90	0,625
VS2-VQ2 [26]	Cheia	119060,10	0,83	89838,72	208898,82	23,61	19,53	0,827
VS3 [26]	Cheia	120616,50	0,83	134087,65	254704,15	28,79	28,56	0,992
VS4-VQ5 [26]	Cheia	119060,10	0,83	179677,44	298737,54	33,77	34,32	1,016
VS9 [26]	Cheia	114589,75	0,83	112731,90	227321,65	25,69	21,56	0,839
VS10-VB1 [26]	Cheia	119060,10	0,83	225463,81	344523,90	38,94	33,30	0,855
VU1 [26]	Cheia	120616,50	0,83	168316,14	288932,64	32,66	23,93	0,733
VU2 [26]	Cheia	120616,50	0,83	168316,14	288932,64	32,66	30,37	0,930
VU3 [26]	Cheia	117483,07	0,83	125609,06	243092,13	27,48	31,04	1,130
VU4 [26]	Cheia	117483,07	0,83	84158,07	201641,14	22,79	25,96	1,139
A2 [27]	Cheia	59539,57	0,99	128367,31	187906,87	21,24	22,58	1,063
A3 [27]	Cheia	60451,40	0,99	132673,31	193124,70	21,83	27,77	1,272
A4 [27]	Cheia	60292,30	0,99	183540,70	243833,00	27,56	34,43	1,249
B3 [27] ⁽¹⁾	Cheia	41068,60	1,40	164274,39	205342,98	23,21	25,29	1,090
B4 [27] ⁽¹⁾	Cheia	40995,16	1,40	163980,63	204975,79	23,17	31,72	1,369
B5UR1 [24]	Cheia	46495,65	1,19	117944,09	164439,74	18,59	19,40	1,044
N-06-06 [15]	Cheia	214532,51	1,16	431016,24	645548,74	72,97	79,70	1,092
N-06-12 [15]	Cheia	214532,51	1,16	401628,77	616161,27	69,64	95,20	1,367
N-07-10 [15]	Cheia	208401,74	1,16	544212,42	752614,16	85,07	111,70	1,313
N-07-16 [15]	Cheia	208401,74	1,16	544212,42	752614,16	85,07	117,30	1,379
N-12-12 [15]	Cheia	214532,51	1,16	803257,53	1017790,04	115,04	116,80	1,015
N-12-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	214532,51	1,16	858130,03	1072662,53	121,24	138,00	1,138
N-14-10 [15] ⁽¹⁾	Cheia	208401,74	1,16	833606,95	1042008,69	117,78	125,00	1,061
N-20-20 [15] ⁽¹⁾	Cheia	214532,51	1,16	858130,03	1072662,53	121,24	158,00	1,303
NBS-43-44 [13]	Cheia	213016,36	1,16	281063,27	494079,62	55,85	60,60	1,085
NBS-82-13 [13]	Cheia	213016,36	1,16	113484,14	326500,50	36,90	52,90	1,433
SW4-1 [29]	Cheia	39571,18	1,50	95646,80	135217,98	15,28	17,30	1,132
\bar{x}								1,1257
s								0,1953
cs								17%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.2 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de alta resistência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	T_c (in – lb)	α_t (–)	T_s (in – lb)	$T_{r,calc}$ (in – lb)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B7UR1 [24]	Cheia	59385,58	1,19	117944,09	177329,67	20,04	18,90	0,943
B9UR1 [24]	Cheia	63987,54	1,19	117944,09	181931,62	20,56	21,10	1,026
B12UR1 [24]	Cheia	66333,40	1,19	117944,09	184277,49	20,83	19,40	0,931
B12UR2 [24]	Cheia	64497,40	1,19	124881,97	189379,38	21,41	18,40	0,860
B12UR3 [24]	Cheia	63085,35	1,19	131825,92	194911,27	22,03	22,50	1,021
B12UR4 [24]	Cheia	64370,32	1,19	136766,25	201136,57	22,73	23,70	1,042
B12UR5 [24]	Cheia	64708,66	1,19	179142,31	243850,98	27,56	24,00	0,871
B14UR1 [24]	Cheia	71597,45	1,19	117944,09	189541,54	21,42	21,00	0,980
H-06-12 [15]	Cheia	319016,95	1,16	401628,77	720645,72	81,45	115,10	1,413
H-07-10 [15]	Cheia	297787,86	1,16	544212,42	842000,28	95,17	126,70	1,331
H-07-16 [15]	Cheia	297787,86	1,16	544212,42	842000,28	95,17	144,50	1,518
H-12-12 [15]	Cheia	319016,95	1,16	803257,53	1122274,48	126,85	155,30	1,224
H-12-16 [15]	Cheia	319016,95	1,16	1018765,65	1337782,60	151,21	196,00	1,296
H-14-10 [15]	Cheia	297787,86	1,16	1112377,85	1410165,71	159,39	135,20	0,848
H-20-20 [15] ⁽¹⁾	Cheia	319016,95	1,16	1276067,80	1595084,75	180,29	239,00	1,326
\bar{x}								1,1088
s								0,2214
cs								20%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.3 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de resistência normal (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	T_c (in – lb)	α_t (–)	T_s (in – lb)	$T_{r,calc}$ (in – lb)	(kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
D3 [18]	Vazada	77024,95	1,18	166803,40	243828,35	27,56	39,11	1,419
D4 [18] ^(a)	Vazada	79960,40	1,18	319841,58	399801,98	45,19	47,93	1,061
T0 [25]	Vazada	315863,35	0,99	475104,77	790968,12	89,40	185,50	2,075
T1 [25]	Vazada	279336,13	0,99	662233,48	941569,61	106,43	140,01	1,316
T2 [25]	Vazada	279415,30	0,99	491304,50	770719,79	87,11	143,10	1,643
T5 [25]	Vazada	412995,10	0,81	774730,62	1187725,71	134,25	156,88	1,169
VH1 [26]	Vazada	81815,34	0,99	104285,31	186100,65	21,03	21,79	1,036
VH2 [26] ^(a)	Vazada	81816,34	0,99	327265,36	409081,71	46,24	34,50	0,746
A1 [7]	Vazada	577911,81	1,00	511888,06	1089799,87	123,18	150,79	1,224
A2 [7]	Vazada	621461,00	0,99	1083722,38	1705183,38	192,74	254,08	1,318
A3 [7]	Vazada	626826,98	0,99	1499730,96	2126557,94	240,36	299,92	1,248
A095c [23]	Vazada	611658,16	1,15	631928,70	1243586,86	140,56	209,98	1,494
A120a [23]	Vazada	559581,96	1,15	361821,23	921403,19	104,15	215,25	2,067
B065b [23]	Vazada	483715,52	1,14	774259,14	1257974,67	142,19	278,00	1,955
B080a [23]	Vazada	647414,76	1,16	1741929,02	2389343,78	270,07	300,66	1,113
B110a [23]	Vazada	717897,45	1,15	501490,62	1219388,07	137,83	237,48	1,723
\bar{x}								1,4128
s								0,3879
cs								27%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.4 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de alta resistência (ACI 318R-89 [1])

Viga	Tipo de secção	T_c (in - lb)	α_t (-)	T_s (in - lb)	$T_{r,calc}$ (in - lb)	(kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
A4 [7]	Vazada	653477,52	0,99	1935469,18	2588946,70	292,63	368,22	1,258
A5 [7]	Vazada	642145,32	0,99	2319524,54	2961669,85	334,76	412,24	1,231
B2 [7]	Vazada	763703,13	0,99	1156714,26	1920417,39	217,06	273,28	1,259
B3 [7]	Vazada	813968,21	0,99	2032838,03	2846806,24	321,77	355,85	1,106
B4 [7]	Vazada	849212,80	1,00	2503759,27	3352972,07	378,99	437,85	1,155
B5 [7]	Vazada	863424,65	0,99	2976661,03	3840085,68	434,04	456,19	1,051
C1 [7]	Vazada	785666,93	1,00	517246,20	1302913,13	147,27	151,76	1,030
C2 [7]	Vazada	827553,57	0,99	1081035,04	1908588,61	215,73	266,14	1,234
C3 [7]	Vazada	830301,46	0,99	1935221,83	2765523,30	312,59	351,17	1,123
C4 [7]	Vazada	832676,45	0,99	2474315,37	3306991,82	373,79	450,31	1,205
C5 [7]	Vazada	863974,66	0,99	3008187,14	3872161,80	437,67	467,26	1,068
C6 [7] ^(a)	Vazada	821839,61	0,99	3287358,46	4109198,07	464,46	521,33	1,122
C065a [23]	Vazada	685916,26	1,21	665220,28	1351136,54	152,72	182,00	1,192
C100a [23]	Vazada	1007340,57	1,16	1793381,09	2800721,66	316,57	370,15	1,169
D075a [23]	Vazada	728468,19	1,17	1845588,77	2574056,96	290,95	339,48	1,167
D090a [23]	Vazada	918194,20	1,16	1794162,21	2712356,41	306,58	343,08	1,119
\bar{x}								1,1556
s								0,0718
cs								6%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.5 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (ACI 318R-10 [2])

Viga	Tipo de secção	$\cot \theta$ (—)	$T_{r,calc}$ (in — lb) (kNm)		$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	259650,46	29,35	37,48	1,277
B4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,99	264702,91	29,92	47,30	1,581
B5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,99	270891,54	30,62	56,11	1,833
B6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,01	263137,58	29,74	61,64	2,072
B7 [18]	Cheia	0,67	244063,37	27,59	26,87	0,974
B8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,45	253519,03	28,66	32,51	1,135
B9	Cheia	1,48	244644,52	27,65	29,80	1,078
C4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	131063,12	14,81	25,29	1,707
C5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,01	131229,42	14,83	29,69	2,002
C6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,99	132057,80	14,93	34,21	2,292
G3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	388422,70	43,90	49,56	1,129
G4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	398767,21	45,07	64,80	1,438
G5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,99	388921,88	43,96	71,91	1,636
G7 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	417304,45	47,17	52,61	1,115
G8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	399253,46	45,13	73,38	1,626
I3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	327880,67	37,06	45,61	1,231
I4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,99	328637,98	37,15	58,02	1,562
I5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,99	328886,38	37,17	70,67	1,901
I6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,01	331646,31	37,49	76,65	2,045
J1 [18]	Cheia	1,00	169208,30	19,13	21,45	1,122
J2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	186954,95	21,13	29,13	1,379
J3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	201456,10	22,77	35,22	1,547
J4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,99	200631,75	22,68	40,64	1,792
K2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	132126,56	14,93	23,71	1,588
K3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	128657,13	14,54	28,45	1,956
K4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	127738,80	14,44	35,00	2,424
M1 [18]	Cheia	1,23	211998,15	23,96	30,37	1,267
M2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,22	270891,54	30,62	40,53	1,324
M3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,22	253519,03	28,66	43,80	1,529
M4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,22	252536,55	28,54	49,56	1,736
M5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,22	259331,12	29,31	55,65	1,899
M6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,32	265640,40	30,03	60,06	2,000
N1 [18]	Cheia	0,99	67803,24	7,66	9,09	1,186
N1a [18]	Cheia	0,99	66609,03	7,53	8,99	1,194
N2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,99	90535,51	10,23	14,45	1,412
N2a [18]	Cheia	0,56	64223,43	7,26	13,21	1,820
N3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,01	85791,25	9,70	12,19	1,257

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.5 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (ACI 318R-10 [2])

Viga	Tipo de secção	$\cot \theta$ (—)	$T_{r,calc}$ (in – lb) (kNm)		$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
N4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	85791,25	9,70	15,69	1,618
VB2 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,97	342497,73	38,71	42,11	1,088
VB3 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,97	416815,74	47,11	46,40	0,985
VB4 [26]	Cheia	0,97	425540,97	48,10	48,54	1,009
VM1 [26]	Cheia	0,99	97236,18	10,99	13,89	1,264
VM2 [26]	Cheia	0,98	314203,28	35,51	39,17	1,103
VM3 [26]	Cheia	1,03	837646,00	94,68	100,80	1,065
VQ1 [26]	Cheia	0,99	221586,66	25,05	21,11	0,843
VQ3 [26]	Cheia	0,98	181153,54	20,48	19,98	0,976
VQ9 [26]	Cheia	1,00	176016,84	19,90	21,90	1,101
VS2-VQ2 [26]	Cheia	0,97	177552,83	20,07	19,53	0,973
VS3 [26]	Cheia	0,97	265665,92	30,03	28,56	0,951
VS4-VQ5 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,97	290557,80	32,84	34,32	1,045
VS9 [26]	Cheia	0,97	222797,79	25,18	21,56	0,856
VS10-VB1 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,97	290557,80	32,84	33,30	1,014
VU1 [26]	Cheia	0,68	235220,30	26,59	23,93	0,900
VU2 [26]	Cheia	0,84	288084,86	32,56	30,37	0,933
VU3 [26](1)	Cheia	1,12	286709,18	32,41	31,04	0,958
VU4 [26]	Cheia	1,37	235220,30	26,59	25,96	0,976
A2 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,86	168947,73	19,10	22,58	1,182
A3 [27] ⁽¹⁾	Cheia	1,01	165126,11	18,66	27,77	1,488
A4 [27] ⁽¹⁾	Cheia	1,02	164691,54	18,62	34,43	1,850
B3 [27] ⁽¹⁾	Cheia	1,00	140900,84	15,93	25,29	1,588
B4 [27] ⁽¹⁾	Cheia	1,02	140648,88	15,90	31,72	1,995
B5UR1 [24] ⁽¹⁾	Cheia	0,95	141268,72	15,97	19,40	1,215
N-06-06 [15]	Cheia	1,06	673405,08	76,11	79,70	1,047
N-06-12 [15] ⁽¹⁾	Cheia	1,39	723456,15	81,77	95,20	1,164
N-07-10 [15] ⁽¹⁾	Cheia	1,20	702781,69	79,44	111,70	1,406
N-07-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	1,55	702781,69	79,44	117,30	1,477
N-12-12 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,98	723456,15	81,77	116,80	1,428
N-12-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	1,15	723456,15	81,77	138,00	1,688
N-14-10 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,84	702781,69	79,44	125,00	1,574
N-20-20 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,98	723456,15	81,77	158,00	1,932
NBS-43-44 [13]	Cheia	1,00	412648,26	46,64	60,60	1,299
NBS-82-13 [13]	Cheia	2,39	398589,94	45,05	52,90	1,174
SW4-1 [29] ⁽¹⁾	Cheia	1,41	106304,80	12,02	17,30	1,440
\bar{x}						1,4064
s						0,3794
cs						27%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.6 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de alta resistência (ACI 318R-10 [2])

Viga	Tipo de secção	$\cot \theta$ (—)	$T_{r,calc}$ (in — lb) (kNm)		$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B7UR1 [24]	Cheia	0,95	160184,17	18,11	18,90	1,044
B9UR1 [24]	Cheia	0,95	160184,17	18,11	21,10	1,165
B12UR1 [24]	Cheia	0,95	160184,17	18,11	19,40	1,071
B12UR2 [24]	Cheia	0,93	164828,15	18,63	18,40	0,988
B12UR3 [24]	Cheia	1,01	189615,20	21,43	22,50	1,050
B12UR4 [24] ⁽¹⁾	Cheia	1,07	195577,69	22,11	23,70	1,072
B12UR5 [24] ⁽¹⁾	Cheia	0,96	196605,70	22,22	24,00	1,080
B14UR1 [24]	Cheia	0,95	160184,17	18,11	21,00	1,160
H-06-12 [15]	Cheia	1,39	823046,53	93,03	115,10	1,237
H-07-10 [15]	Cheia	1,20	960980,69	108,62	126,70	1,166
H-07-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	1,55	1004213,58	113,51	144,50	1,273
H-12-12 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,98	1075803,28	121,60	155,30	1,277
H-12-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	1,15	1075803,28	121,60	196,00	1,612
H-14-10 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,84	1004213,58	113,51	135,20	1,191
H-20-20 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,98	1075803,28	121,60	239,00	1,965
\bar{x}						1,2235
s						0,254
cs						21%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.7 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de resistência normal (ACI 318R-10 [2])

Viga	Tipo de secção	cot θ (—)	$T_{r,calc}$		$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
			(in – lb)	(kNm)		
D3 [18] ⁽¹⁾	Vazada	1,27	250427,37	28,31	39,11	1,382
D4 [18] ⁽¹⁾	Vazada	0,99	259971,23	29,38	47,93	1,631
T0 [25] ⁽¹⁾	Vazada	1,48	992853,27	112,22	185,50	1,653
T1 [25] ⁽¹⁾	Vazada	0,98	978785,98	110,63	140,01	1,266
T2 [25] ⁽¹⁾	Vazada	1,11	878286,10	99,27	143,10	1,441
T5 [25]	Vazada	0,75	1212666,79	137,07	156,88	1,145
VH1 [26]	Vazada	0,99	177893,75	20,11	21,79	1,084
VH2 [26] ⁽¹⁾	Vazada	0,50	290810,27	32,87	34,50	1,050
A1 [7]	Vazada	1,03	899333,91	101,65	150,79	1,483
A2 [7]	Vazada	1,00	1877128,46	212,17	254,08	1,198
A3 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,98	2137871,77	241,64	299,92	1,241
A095c [23]	Vazada	1,01	946415,58	106,97	209,98	1,963
A120a [23]	Vazada	1,86	992932,54	112,23	215,25	1,918
B065b [23] ⁽¹⁾	Vazada	1,99	1657561,70	187,35	278,00	1,484
B080a [23] ⁽¹⁾	Vazada	1,00	2219833,47	250,91	300,66	1,198
B110a [23]	Vazada	1,55	1149859,99	129,97	237,48	1,827
\bar{x}						1,4352
s						0,2937
cs						20%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.8 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de alta resistência (ACI 318R-10 [2])

Viga	Tipo de secção	$\cot \theta$ (—)	$T_{r,calc}$ (in – lb) (kNm)		$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
A4 [7] ⁽¹⁾	Vazada	1,01	2106103,59	238,05	368,22	1,547
A5 [7] ⁽¹⁾	Vazada	1,05	2113428,67	238,88	412,24	1,726
B2 [7]	Vazada	1,00	1974983,14	223,23	273,28	1,224
B3 [7] ⁽¹⁾	Vazada	1,00	2760717,31	312,04	355,85	1,140
B4 [7] ⁽¹⁾	Vazada	1,04	2805102,48	317,06	437,85	1,381
B5 [7] ⁽¹⁾	Vazada	1,05	2735082,24	309,15	456,19	1,476
C1 [7]	Vazada	1,03	906833,32	102,50	151,76	1,481
C2 [7]	Vazada	1,01	1866680,92	210,99	266,14	1,261
C3 [7] ⁽¹⁾	Vazada	1,03	2884778,64	326,07	351,17	1,077
C4 [7] ⁽¹⁾	Vazada	1,03	2925175,02	330,63	450,31	1,362
C5 [7] ⁽¹⁾	Vazada	1,02	2990756,28	338,05	467,26	1,382
C6 [7] ⁽¹⁾	Vazada	1,00	2735623,85	309,21	521,33	1,686
C065a [23]	Vazada	1,21	1136866,19	128,50	182,00	1,416
C100a [23]	Vazada	1,00	2629974,24	297,27	370,15	1,245
D075a [23] ⁽¹⁾	Vazada	0,99	2500392,14	282,62	339,48	1,201
D090a [23]	Vazada	1,00	2636774,97	298,03	343,08	1,151
\bar{x}						1,3598
s						0,1907
cs						14%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.9 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (MC90 [9])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	$\sin \theta$ (-)	A_{ef} (m ²)	δ (-)	T_{Rtw} (kNm)	T_{Rcw} (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,52	0,46	0,05	0,83	57,56	43,74	43,74	37,48	0,857
B4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,53	0,46	0,05	0,83	77,11	45,39	45,39	47,30	1,042
B5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,53	0,47	0,05	0,83	105,53	47,26	47,26	56,11	1,187
B6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,51	0,46	0,05	0,83	128,04	44,89	44,89	61,64	1,373
B7 [18]	Cheia	0,77	0,61	0,05	0,83	37,91	48,24	37,91	26,87	0,709
B8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,15	0,76	0,05	0,83	56,87	50,58	50,58	32,51	0,643
B9 [18]	Cheia	0,35	0,33	0,05	0,83	38,00	34,30	34,30	29,80	0,869
C4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,46	0,42	0,03	0,75	48,67	20,34	20,34	25,29	1,244
C5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,45	0,41	0,03	0,75	62,71	20,38	20,38	29,69	1,457
C6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,46	0,42	0,03	0,75	78,40	20,82	20,82	34,21	1,643
G3 [18]	Cheia	0,56	0,49	0,07	0,88	63,35	67,14	63,35	49,56	0,782
G4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,56	0,49	0,07	0,88	82,97	70,29	70,29	64,80	0,922
G5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,56	0,49	0,07	0,88	111,79	67,48	67,48	71,91	1,066
G7 [18]	Cheia	0,56	0,49	0,07	0,88	63,38	76,27	63,38	52,61	0,830
G8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,55	0,48	0,07	0,88	89,92	70,28	70,28	73,38	1,044
I3 [18]	Cheia	0,52	0,46	0,05	0,83	60,34	64,69	60,34	45,61	0,756
I4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,53	0,46	0,05	0,83	75,94	65,13	65,13	58,02	0,891
I5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,53	0,47	0,05	0,83	98,52	65,23	65,23	70,67	1,083
I6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,51	0,46	0,05	0,83	125,65	66,03	66,03	76,65	1,161
J1 [18]	Cheia	0,52	0,46	0,05	0,83	26,28	23,75	23,75	21,45	0,903
J2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,52	0,46	0,05	0,83	39,77	24,06	24,06	29,13	1,211
J3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,52	0,46	0,05	0,83	68,28	27,61	27,61	35,22	1,276
J4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,53	0,46	0,05	0,83	78,10	27,49	27,49	40,64	1,478
K2 [18]	Cheia	0,62	0,53	0,04	0,92	27,28	33,31	27,28	23,71	0,869
K3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,61	0,52	0,04	0,92	36,59	32,08	32,08	28,45	0,887
K4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,61	0,52	0,04	0,92	54,77	31,80	31,80	35,00	1,101
M1 [18]	Cheia	0,43	0,39	0,05	0,83	32,93	40,56	32,93	30,37	0,922
M2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,43	0,39	0,05	0,83	47,21	41,42	41,42	40,53	0,979
M3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,43	0,39	0,05	0,83	63,00	36,87	36,87	43,80	1,188
M4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,43	0,39	0,05	0,83	82,58	36,78	36,78	49,56	1,347
M5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,43	0,39	0,05	0,83	107,65	38,91	38,91	55,65	1,430
M6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,39	0,37	0,05	0,83	113,71	37,89	37,89	60,06	1,585
N1 [18]	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,88	9,97	15,83	9,97	9,09	0,912
N1a [18]	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,88	9,79	15,45	9,79	8,99	0,918
N2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,88	16,99	16,24	16,24	14,45	0,890
N2a [18]	Cheia	0,55	0,48	0,03	0,88	16,90	15,21	15,21	13,21	0,869
N3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,55	0,48	0,03	0,88	14,67	14,66	14,66	12,19	0,832

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.9 (cont.) - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (MC90 [9])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	$\sin \theta$ (-)	A_{ef} (cm ²)	δ (-)	T_{Rtw} (kNm)	T_{RCw} (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
N4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,88	22,15	14,72	14,72	15,69	1,066
VB2 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,63	0,54	0,06	0,86	50,64	52,38	50,64	42,11	0,832
VB3 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,63	0,54	0,06	0,86	50,64	73,32	50,64	46,40	0,916
VB4 [26]	Cheia	0,63	0,54	0,06	0,86	50,64	88,82	50,64	48,54	0,959
VM1 [26]	Cheia	0,54	0,48	0,03	0,86	13,43	20,17	13,43	13,89	1,034
VM2 [26]	Cheia	0,54	0,48	0,06	0,86	43,17	63,45	43,17	39,17	0,907
VM3 [26]	Cheia	0,52	0,46	0,10	0,86	114,78	160,09	114,78	100,80	0,878
VQ1 [26]	Cheia	0,55	0,48	0,06	0,75	25,79	33,05	25,79	21,11	0,819
VQ3 [26]	Cheia	0,65	0,55	0,06	0,92	21,94	35,44	21,94	19,98	0,911
VQ9 [26]	Cheia	0,64	0,54	0,06	0,96	22,18	34,77	22,18	21,90	0,987
VS2-VQ2 [26]	Cheia	0,60	0,52	0,06	0,86	22,27	37,99	22,27	19,53	0,877
VS3 [26]	Cheia	0,62	0,53	0,06	0,86	32,19	39,48	32,19	28,56	0,887
VS4-VQ5 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,63	0,54	0,06	0,86	42,26	38,90	38,90	34,32	0,882
VS9 [26]	Cheia	0,60	0,52	0,06	0,86	27,95	35,40	27,95	21,56	0,771
VS10-VB1 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,63	0,54	0,06	0,86	53,02	38,90	38,90	33,30	0,856
VU1 [26]	Cheia	0,85	0,65	0,06	0,86	29,50	43,47	29,50	23,93	0,811
VU2 [26]	Cheia	0,72	0,58	0,06	0,86	34,91	41,75	34,91	30,37	0,870
VU3 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,55	0,48	0,06	0,86	34,20	35,36	34,20	31,04	0,908
VU4 [26]	Cheia	0,45	0,41	0,06	0,86	27,99	31,34	27,99	25,96	0,927
A2 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,54	0,47	0,04	0,75	30,12	29,04	29,04	22,58	0,777
A3 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,46	0,42	0,04	0,75	37,18	27,17	27,17	27,77	1,022
A4 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,46	0,42	0,04	0,75	51,99	26,87	26,87	34,43	1,282
B3 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,88	32,71	31,83	31,83	25,29	0,795
B4 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,55	0,48	0,03	0,88	43,94	31,76	31,76	31,72	0,999
B5UR1 [24] ⁽¹⁾	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,83	26,29	31,09	26,29	19,40	0,738
N-06-06 [15]	Cheia	0,48	0,44	0,10	0,83	104,32	123,97	104,32	79,70	0,764
N-06-12 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,43	0,39	0,10	0,83	110,42	114,02	110,42	95,20	0,862
N-07-10 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,43	0,39	0,10	0,83	148,88	108,94	108,94	111,70	1,025
N-07-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,37	0,35	0,10	0,83	171,91	98,16	98,16	117,30	1,195
N-12-12 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,60	0,52	0,10	0,83	156,16	139,72	139,72	116,80	0,836
N-12-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,45	0,10	0,83	239,86	126,08	126,08	138,00	1,095
N-14-10 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,61	0,52	0,10	0,83	212,85	134,01	134,01	125,00	0,933
N-20-20 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,57	0,50	0,10	0,83	371,17	136,23	136,23	158,00	1,160
NBS-43-44 [13]	Cheia	0,52	0,46	0,10	0,83	63,93	127,16	63,93	60,60	0,948
NBS-82-13 [13]	Cheia	0,22	0,21	0,10	0,83	61,75	64,30	61,75	52,90	0,857
SW4-1 [29] ⁽¹⁾	Cheia	0,44	0,40	0,03	0,92	23,04	32,40	23,04	17,30	0,751
\bar{x}										0,990
s										0,2124
cs										21%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.10 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de alta resistência (MC90 [9])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	$\sin \theta$ (-)	A_{ef} (cm^2)	δ (-)	T_{Rtw} (kNm)	T_{RCw} (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B7UR1 [24]	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,83	26,29	44,91	26,29	18,90	0,7189
B9UR1 [24]	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,83	26,29	49,33	26,29	21,10	0,8026
B12UR1 [24]	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,83	26,29	51,40	26,29	19,40	0,7379
B12UR2 [24]	Cheia	0,57	0,50	0,03	0,83	27,05	50,53	27,05	18,40	0,6802
B12UR3 [24]	Cheia	0,53	0,47	0,03	0,83	31,12	47,01	31,12	22,50	0,723
B12UR4 [24]	Cheia	0,50	0,45	0,03	0,83	34,08	46,65	34,08	23,70	0,6953
B12UR5 [24]	Cheia	0,55	0,48	0,03	0,83	39,14	50,39	39,14	24,00	0,6132
B14UR1 [24]	Cheia	0,56	0,49	0,03	0,83	26,29	55,39	26,29	21,00	0,7988
H-06-12 [15]	Cheia	0,43	0,39	0,10	0,83	110,42	203,40	110,42	115,10	1,0423
H-07-10 [15]	Cheia	0,43	0,39	0,10	0,83	148,88	187,85	148,88	126,70	0,851
H-07-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,37	0,35	0,10	0,83	171,91	169,26	169,26	144,50	0,8537
H-12-12 [15]	Cheia	0,60	0,52	0,10	0,83	156,16	249,26	156,16	155,30	0,9945
H-12-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,45	0,10	0,83	239,86	224,92	224,92	196,00	0,8714
H-14-10 [15]	Cheia	0,61	0,52	0,10	0,83	212,85	231,09	212,85	135,20	0,6352
H-20-20 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,57	0,50	0,10	0,83	371,17	243,02	243,02	239,00	0,9835
\bar{x}										0,800
s										0,1322
cs										17%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.11 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de resistência normal (MC90 [9])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	$\sin \theta$ (-)	A_{ef} (cm^2)	δ (-)	T_{Rtw} (kNm)	T_{Rcw} (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
D3 [18] ⁽¹⁾	Vazada	0,42	0,39	0,06	0,83	51,65	35,76	35,76	39,11	1,0936
D4 [18] ⁽¹⁾	Vazada	0,54	0,47	0,06	0,83	87,04	44,54	44,54	47,93	1,0761
T0 [25] ⁽¹⁾	Vazada	0,42	0,39	0,18	0,75	184,19	174,59	174,59	185,50	1,0625
T1 [25]	Vazada	0,62	0,53	0,18	0,75	157,06	178,51	157,06	140,01	0,8914
T2 [25]	Vazada	0,56	0,49	0,18	0,75	142,81	170,58	142,81	143,10	1,002
T5 [25]	Vazada	0,87	0,66	0,23	0,88	207,09	380,87	207,09	156,88	0,7576
VH1 [26]	Vazada	0,55	0,48	0,06	0,75	20,83	30,00	20,83	21,79	1,0462
VH2 [26] ⁽¹⁾	Vazada	1,20	0,77	0,06	0,75	76,85	34,87	34,87	34,50	0,9893
A1 [7]	Vazada	0,58	0,50	0,25	0,75	129,43	391,27	129,43	150,79	1,165
A2 [7]	Vazada	0,59	0,51	0,24	0,75	270,11	407,22	270,11	254,08	0,9407
A3 [7]	Vazada	0,62	0,53	0,24	0,75	346,99	414,07	346,99	299,92	0,8643
A095c [23]	Vazada	0,50	0,45	0,20	0,83	142,59	359,28	142,59	209,98	1,4726
A120a [23]	Vazada	0,31	0,29	0,20	0,83	132,93	210,92	132,93	215,25	1,6193
B065b [23] ⁽¹⁾	Vazada	0,30	0,29	0,25	0,82	372,03	216,92	216,92	278,00	1,2816
B080a [23]	Vazada	0,59	0,51	0,24	0,83	389,01	451,28	389,01	300,66	0,7729
B110a [23]	Vazada	0,37	0,34	0,20	0,82	154,25	374,90	154,25	237,48	1,5396
\bar{x}										1,0984
s										0,260
cs										24%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.13 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de alta resistência (MC90 [9])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	$\sin \theta$ (-)	A_{ef} (cm^2)	δ (-)	T_{Rtw} (kNm)	T_{Rcw} (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
A4 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,42	0,39	0,60	0,83	51,65	35,76	35,76	39,11	1,0936
A5 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,54	0,47	0,60	0,83	87,04	44,54	44,54	47,93	1,0761
B2 [7]	Vazada	0,42	0,39	1,76	0,75	184,19	174,59	174,59	185,50	1,0625
B3 [7]	Vazada	0,62	0,53	1,76	0,75	157,06	178,51	157,06	140,01	0,8914
B4 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,56	0,49	1,76	0,75	142,81	170,58	142,81	143,10	1,002
B5 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,87	0,66	2,30	0,88	207,09	380,87	207,09	156,88	0,7576
C1 [7]	Vazada	0,55	0,48	0,60	0,75	20,83	30,00	20,83	21,79	1,0462
C2 [7]	Vazada	1,20	0,77	0,60	0,75	76,85	34,87	34,87	34,50	0,9893
C3 [7]	Vazada	0,58	0,50	2,52	0,75	129,43	391,27	129,43	150,79	1,165
C4 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,59	0,51	2,43	0,75	270,11	407,22	270,11	254,08	0,9407
C5 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,62	0,53	2,41	0,75	346,99	414,07	346,99	299,92	0,8643
C6 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,50	0,45	1,99	0,83	142,59	359,28	142,59	209,98	1,4726
C065a [23]	Vazada	0,31	0,29	2,02	0,83	132,93	210,92	132,93	215,25	1,6193
C100a [23]	Vazada	0,30	0,29	2,54	0,82	372,03	216,92	216,92	278,00	1,2816
D075a [23]	Vazada	0,59	0,51	2,36	0,83	389,01	451,28	389,01	300,66	0,7729
D090a [23]	Vazada	0,37	0,34	1,98	0,82	154,25	374,90	154,25	237,48	1,5396
\bar{x}										1,0984
s										0,260
cs										24%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.13 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (MC10 [10])

Viga	Tipo de secção	k_c (—)	$\tan \theta$ (—)	$T_{Rd,d}$ (kNm)	$T_{Rd,máx}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,55	-	33,56	33,56	37,48	1,117
B4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,56	-	34,98	34,98	47,30	1,352
B5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,56	-	36,65	36,65	56,11	1,531
B6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,55	-	34,26	34,26	61,64	1,799
B7 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,82	-	35,97	35,97	26,87	0,747
B8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	1,22	-	36,98	36,98	32,51	0,879
B9 [18]	Cheia	0,50	0,38	-	26,74	26,74	29,80	1,115
C4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,50	-	19,28	19,28	25,29	1,311
C5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,50	-	19,26	19,26	29,69	1,541
C6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,50	-	19,67	19,67	34,21	1,739
G3 [18]	Cheia	0,50	0,59	-	45,23	45,23	49,56	1,096
G4 [18]	Cheia	0,50	0,59	-	47,65	47,65	64,80	1,360
G5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,59	-	45,46	45,46	71,91	1,582
G7 [18]	Cheia	0,50	0,59	-	52,30	52,30	52,61	1,006
G8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,58	-	47,66	47,66	73,38	1,540
I3 [18]	Cheia	0,47	0,55	-	50,00	50,00	45,61	0,912
I4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,47	0,56	-	50,29	50,29	58,02	1,154
I5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,47	0,56	-	50,35	50,35	70,67	1,403
I6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,46	0,55	-	50,39	50,39	76,65	1,521
J1 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,56	-	17,19	17,19	21,45	1,248
J2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,56	-	17,43	17,43	29,13	1,671
J3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,55	-	20,20	20,20	35,22	1,744
J4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,56	-	20,10	20,10	40,64	2,022
K2 [18]	Cheia	0,50	0,63	-	27,54	27,54	23,71	0,861
K3 [18]	Cheia	0,50	0,63	-	26,07	26,07	28,45	1,091
K4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,64	-	25,80	25,80	35,00	1,357
M1 [18]	Cheia	0,50	0,45	-	31,59	31,59	30,37	0,961
M2 [18]	Cheia	0,50	0,45	-	32,36	32,36	40,53	1,252
M3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,45	-	28,34	28,34	43,80	1,546
M4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,46	-	28,23	28,23	49,56	1,755
M5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,46	-	29,80	29,80	55,65	1,867
M6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,42	-	29,52	29,52	60,06	2,035
N1 [18]	Cheia	0,50	0,59	-	10,53	10,53	9,09	0,863
N1a [18]	Cheia	0,50	0,59	-	10,23	10,23	8,99	0,878
N2 [18]	Cheia	0,50	0,59	-	10,84	10,84	14,45	1,333
N2a [18]	Cheia	0,50	1,04	-	11,55	11,55	13,21	1,143
N3 [18]	Cheia	0,50	0,58	-	9,66	9,66	12,19	1,262

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.13 (cont.) - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (MC10 [10])

Viga	Tipo de secção	k_c (—)	$\tan \theta$ (—)	$T_{Rd,d}$ (kNm)	$T_{Rd,m\acute{a}x}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
N4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,59	-	9,70	9,70	15,69	1,618
VB2 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,58	-	29,71	29,71	42,11	1,417
VB3 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,49	0,58	-	43,48	43,48	46,40	1,067
VB4 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,45	0,58	-	50,18	50,18	48,54	0,967
VM1 [26]	Cheia	0,49	0,58	-	12,82	12,82	13,89	1,084
VM2 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,57	-	40,29	40,29	39,17	0,972
VM3 [26]	Cheia	0,49	0,55	-	101,44	101,44	100,80	0,994
VQ1 [26]	Cheia	0,50	0,49	-	24,32	24,32	21,11	0,868
VQ3 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,63	-	16,73	16,73	19,98	1,194
VQ9 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,66	-	16,92	16,92	21,90	1,294
VS2-VQ2 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,58	-	21,38	21,38	19,53	0,913
VS3 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,58	-	21,92	21,92	28,56	1,303
VS4-VQ5 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,58	-	21,38	21,38	34,32	1,605
VS9 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,58	-	19,81	19,81	21,56	1,089
VS10-VB1 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,58	-	21,38	21,38	33,30	1,557
VU1 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,83	-	24,73	24,73	23,93	0,967
VU2 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,67	-	23,36	23,36	30,37	1,300
VU3 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,50	-	19,23	19,23	31,04	1,614
VU4 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,41	-	16,87	16,87	25,96	1,539
A2 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,58	-	26,09	26,09	22,58	0,865
A3 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,49	0,50	-	25,79	25,79	27,77	1,077
A4 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,49	0,49	-	25,54	25,54	34,43	1,348
B3 [27]	Cheia	0,50	0,59	-	26,74	26,74	25,29	0,946
B4 [27] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,58	-	26,44	26,44	31,72	1,200
B5UR1 [24]	Cheia	0,49	0,58	-	28,34	28,34	19,40	0,684
N-06-06 [15]	Cheia	0,50	0,52	-	97,65	97,65	79,70	0,816
N-06-12 [15]	Cheia	0,50	0,39	-	81,63	81,63	95,20	1,166
N-07-10 [15]	Cheia	0,50	0,46	-	85,43	85,43	111,70	1,308
N-07-16 [15]	Cheia	0,50	0,35	-	71,08	71,08	117,30	1,650
N-12-12 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,56	-	101,80	101,80	116,80	1,147
N-12-16 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,47	-	92,80	92,80	138,00	1,487
N-14-10 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,65	-	103,50	103,50	125,00	1,208
N-20-20 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,50	0,56	-	101,83	101,83	158,00	1,552
NBS-43-44 [13]	Cheia	0,50	0,55	-	99,67	99,67	60,60	0,608
NBS-82-13 [13]	Cheia	0,50	0,23	-	51,51	51,51	52,90	1,027
SW4-1 [29]	Cheia	0,47	0,45	-	30,94	30,94	17,30	0,559
\bar{x}								1,2549
s								0,3314
cs								26%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.14 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de alta resistência (MC10 [10])

Viga	Tipo de secção	k_c (—)	$\tan \theta$ (—)	$T_{Rd,d}$ (kNm)	$T_{Rd,máx}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B7UR1 [24]	Cheia	0,40	0,58	-	38,07	38,07	18,90	0,4964
B9UR1 [24]	Cheia	0,38	0,58	-	41,79	41,79	21,10	0,5049
B12UR1 [24]	Cheia	0,37	0,58	-	43,72	43,72	19,40	0,4437
B12UR2 [24]	Cheia	0,38	0,60	-	42,79	42,79	18,40	0,43
B12UR3 [24]	Cheia	0,39	0,55	-	39,86	39,86	22,50	0,5645
B12UR4 [24]	Cheia	0,38	0,52	-	39,67	39,67	23,70	0,5975
B12UR5 [24]	Cheia	0,38	0,58	-	42,33	42,33	24,00	0,567
B14UR1 [24]	Cheia	0,35	0,58	-	48,16	48,16	21,00	0,4361
H-06-12 [15]	Cheia	0,38	0,39	-	135,78	135,78	115,10	0,8477
H-07-10 [15]	Cheia	0,40	0,46	-	138,14	138,14	126,70	0,9172
H-07-16 [15]	Cheia	0,40	0,35	-	114,93	114,93	144,50	1,2573
H-12-12	Cheia	0,38	0,56	-	169,32	169,32	155,30	0,9172
H-12-16 [15]	Cheia	0,38	0,47	-	154,35	154,35	196,00	1,2699
H-14-10 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,40	0,65	-	167,36	167,36	135,20	0,8078
H-20-20 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,38	0,56	-	169,37	169,37	239,00	1,4111
\bar{x}								0,7646
s								0,3317
cs								43%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.15 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de resistência normal (MC10 [10])

Viga	Tipo de secção	k_c (—)	$\tan \theta$ (—)	$T_{Rd,d}$ (kNm)	$T_{Rd,máx}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
D3 [18]	Vazada	0,50	0,42	71,90	47,66	47,66	39,11	0,8205
D4 [18]	Vazada	0,50	0,54	92,97	59,94	59,94	47,93	0,7996
T0 [25]	Vazada	0,47	0,33	243,39	186,39	186,39	185,50	0,9952
T1 [25]	Vazada	0,50	0,49	281,60	229,43	229,43	140,01	0,6102
T2 [25]	Vazada	0,50	0,44	237,77	193,69	193,69	143,10	0,7388
T5 [25]	Vazada	0,46	0,78	309,81	403,11	309,81	156,88	0,5064
VH1 [26]	Vazada	0,50	0,45	69,38	47,56	47,56	21,79	0,4583
VH2 [26] ⁽¹⁾	Vazada	0,50	0,90	92,08	63,12	63,12	34,50	0,5466
A1 [7]	Vazada	0,45	0,47	536,56	483,88	483,88	150,79	0,3116
A2 [7]	Vazada	0,46	0,48	576,30	513,15	513,15	254,08	0,4951
A3 [7]	Vazada	0,46	0,49	594,72	529,86	529,86	299,92	0,566
A095c [23]	Vazada	0,50	0,50	528,39	581,03	528,39	209,98	0,3974
A120a [23]	Vazada	0,50	0,27	324,18	366,34	324,18	215,25	0,664
B065b [23]	Vazada	0,49	0,27	219,27	255,38	219,27	278,00	1,2678
B080a [23]	Vazada	0,46	0,53	520,52	574,30	520,52	300,66	0,5776
B110a [23]	Vazada	0,45	0,33	568,17	567,37	567,37	237,48	0,4186
\bar{x}								0,6359
s								0,2443
cs								38%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.16 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de alta resistência (MC10 [10])

Viga	Tipo de secção	k_c (—)	$\tan \theta$ (—)	$T_{Rd,d}$ (kNm)	$T_{Rd,máx}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
A4 [7]	Vazada	0,43	0,48	604,46	526,31	526,31	368,22	0,700
A5 [7]	Vazada	0,44	0,46	583,70	511,20	511,20	412,24	0,8064
B2 [7]	Vazada	0,39	0,48	790,93	659,29	659,29	273,28	0,4145
B3 [7]	Vazada	0,38	0,48	873,91	717,39	717,39	355,85	0,496
B4 [7]	Vazada	0,37	0,46	876,09	712,32	712,32	437,85	0,6147
B5 [7]	Vazada	0,38	0,46	850,40	688,61	688,61	456,19	0,6625
C1 [7]	Vazada	0,36	0,47	869,34	718,72	718,72	151,76	0,2112
C2 [7]	Vazada	0,35	0,48	904,38	740,20	740,20	266,14	0,3595
C3 [7]	Vazada	0,36	0,47	920,19	752,43	752,43	351,17	0,4667
C4 [7]	Vazada	0,36	0,46	926,17	756,86	756,86	450,31	0,595
C5 [7]	Vazada	0,35	0,47	969,14	786,40	786,40	467,26	0,5942
C6 [7]	Vazada	0,36	0,48	883,51	723,78	723,78	521,33	0,720
C065a [23]	Vazada	0,38	0,45	509,79	592,36	509,79	182,00	0,357
C100a [23]	Vazada	0,36	0,52	997,83	978,46	978,46	370,15	0,3783
D075a [23]	Vazada	0,35	0,54	676,00	716,45	676,00	339,48	0,5022
D090a [23]	Vazada	0,34	0,53	902,83	903,98	902,83	343,08	0,38
\bar{x}								0,5161
s								0,1626
cs								32%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.17 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (EC2 [11])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	v (-)	z (cm)	T_R (kNm)	$T_{R,m\acute{a}x}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B3	Cheia	0,93	0,55	30,48	38,81	63,79	38,81	37,48	0,966
B4	Cheia	0,93	0,55	30,48	52,00	66,01	52,00	47,30	0,910
B5 ⁽¹⁾	Cheia	0,94	0,55	30,48	71,16	68,72	68,72	56,11	0,817
B6 ⁽¹⁾	Cheia	0,92	0,55	30,48	88,33	65,24	65,24	61,64	0,945
B7	Cheia	1,38	0,56	30,48	25,56	56,83	25,56	26,87	1,051
B8	Cheia	2,05	0,55	30,48	38,35	48,26	38,35	32,51	0,848
B9	Cheia	0,63	0,55	30,48	25,62	59,03	25,62	29,80	1,163
C4	Cheia	0,94	0,55	19,05	34,14	34,62	34,14	25,29	0,741
C5 ⁽¹⁾	Cheia	0,93	0,55	19,05	45,14	34,68	34,68	29,69	0,856
C6 ⁽¹⁾	Cheia	0,95	0,55	19,05	57,97	35,10	35,10	34,21	0,975
G3	Cheia	0,93	0,55	42,33	43,27	90,10	43,27	49,56	1,145
G4	Cheia	0,93	0,55	42,33	56,67	94,37	56,67	64,80	1,144
G5	Cheia	0,94	0,55	42,33	76,35	90,34	76,35	71,91	0,942
G7	Cheia	0,93	0,54	42,33	43,29	102,17	43,29	52,61	1,215
G8	Cheia	0,93	0,55	42,33	61,41	94,54	61,41	73,38	1,195
I3	Cheia	0,93	0,51	30,48	40,69	94,34	40,69	45,61	1,121
I4	Cheia	0,93	0,51	30,48	51,21	94,72	51,21	58,02	1,133
I5	Cheia	0,94	0,51	30,48	66,44	94,84	66,44	70,67	1,064
I6	Cheia	0,92	0,51	30,48	86,67	95,97	86,67	76,65	0,884
J1	Cheia	0,93	0,58	30,48	17,72	34,56	17,72	21,45	1,210
J2	Cheia	0,93	0,58	30,48	26,82	35,03	26,82	29,13	1,086
J3 ⁽¹⁾	Cheia	0,93	0,58	30,48	46,04	40,27	40,27	35,22	0,875
J4 ⁽¹⁾	Cheia	0,93	0,58	30,48	52,67	39,98	39,98	40,64	1,017
K2	Cheia	0,96	0,55	43,70	19,42	40,03	19,42	23,71	1,221
K3	Cheia	0,96	0,55	43,70	28,19	38,21	28,19	28,45	1,009
K4 ⁽¹⁾	Cheia	0,97	0,55	43,70	43,98	37,75	37,75	35,00	0,927
M1	Cheia	0,76	0,55	30,48	22,20	65,00	22,20	30,37	1,368
M2	Cheia	0,76	0,55	30,48	31,83	66,33	31,83	40,53	1,273
M3	Cheia	0,76	0,55	30,48	42,49	59,06	42,49	43,80	1,031
M4	Cheia	0,76	0,56	30,48	55,69	58,75	55,69	49,56	0,890
M5 ⁽¹⁾	Cheia	0,76	0,55	30,48	74,26	61,59	61,59	55,65	0,904
M6 ⁽¹⁾	Cheia	0,70	0,55	30,48	76,68	62,62	62,62	60,06	0,959
N1	Cheia	0,94	0,55	25,40	6,81	21,17	6,81	9,09	1,335
N1a	Cheia	0,94	0,55	25,40	6,69	20,66	6,69	8,99	1,344
N2	Cheia	0,94	0,55	25,40	11,61	21,73	11,61	14,45	1,245
N2a	Cheia	1,66	0,55	25,40	6,45	18,16	6,45	13,21	2,049
N3	Cheia	0,92	0,55	25,40	10,02	19,76	10,02	12,19	1,217
N4	Cheia	0,93	0,55	25,40	15,13	19,77	15,13	15,69	1,037
VB2	Cheia	0,94	0,56	36,24	39,78	66,88	39,78	42,11	1,058

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.17 (cont.) - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (EC2 [11])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	ν (-)	z (cm)	T_R (kNm)	$T_{R,máx}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
VB3	Cheia	0,94	0,53	36,24	39,78	93,62	39,78	46,40	1,166
VB4	Cheia	0,94	0,50	36,24	39,78	113,41	39,78	48,54	1,220
VM1	Cheia	0,92	0,53	24,22	9,14	27,79	9,14	13,89	1,520
VM2	Cheia	0,92	0,53	36,24	29,37	87,51	29,37	39,17	1,333
VM3	Cheia	0,88	0,52	48,34	78,10	225,01	78,10	100,80	1,291
VQ1	Cheia	0,90	0,57	24,30	21,06	51,84	21,06	21,11	1,003
VQ3	Cheia	0,95	0,58	50,96	16,45	42,05	16,45	19,98	1,215
VQ9	Cheia	0,96	0,57	74,64	15,58	39,89	15,58	21,90	1,406
VS2-VQ2	Cheia	0,94	0,57	36,24	16,60	49,67	16,60	19,53	1,177
VS3	Cheia	0,93	0,57	36,24	24,84	50,86	24,84	28,56	1,150
VS4-VQ5	Cheia	0,94	0,57	36,24	33,20	49,67	33,20	34,32	1,034
VS9	Cheia	0,94	0,58	36,24	20,83	46,28	20,83	21,56	1,035
VS10-VB1	Cheia	0,94	0,57	36,24	41,66	49,67	41,66	33,30	0,799
VU1	Cheia	1,32	0,57	36,24	21,99	49,06	21,99	23,93	1,088
VU2	Cheia	1,08	0,57	36,24	26,93	50,84	26,93	30,37	1,128
VU3	Cheia	0,81	0,57	36,24	26,87	47,49	26,87	31,04	1,155
VU4	Cheia	0,66	0,57	36,24	21,99	44,70	21,99	25,96	1,180
A2	Cheia	1,07	0,53	19,05	20,08	46,32	20,08	22,58	1,125
A3	Cheia	0,92	0,52	19,05	24,79	47,46	24,79	27,77	1,120
A4	Cheia	0,91	0,53	19,05	34,66	47,21	34,66	34,43	0,993
B3	Cheia	0,94	0,53	29,63	22,55	42,26	22,55	25,29	1,122
B4	Cheia	0,93	0,53	29,63	31,30	42,09	31,30	31,72	1,014
B5UR1	Cheia	0,99	0,52	24,41	17,73	43,85	17,73	19,40	1,094
N-06-06	Cheia	0,87	0,53	39,71	70,20	189,68	70,20	79,70	1,135
N-06-12	Cheia	0,67	0,53	39,71	85,80	176,60	85,80	95,20	1,110
N-07-10	Cheia	0,77	0,54	39,71	100,18	176,36	100,18	111,70	1,115
N-07-16	Cheia	0,60	0,54	39,71	129,34	160,62	129,34	117,30	0,907
N-12-12	Cheia	0,94	0,53	39,71	121,35	191,08	121,35	116,80	0,963
N-12-16	Cheia	0,80	0,53	39,71	180,47	186,90	180,47	138,00	0,765
N-14-10	Cheia	1,10	0,54	39,71	143,23	181,38	143,23	125,00	0,873
N-20-20 ⁽¹⁾	Cheia	0,94	0,53	39,71	273,61	191,09	191,09	158,00	0,827
NBS-43-44	Cheia	0,93	0,54	39,71	43,02	188,65	43,02	60,60	1,409
NBS-82-13	Cheia	0,39	0,54	39,71	41,55	127,67	41,55	52,90	1,273
SW4-1	Cheia	0,70	0,51	39,38	19,05	44,21	19,05	17,30	0,908
\bar{x}									1,093
s									0,201
cs									18%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.18 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de alta resistência (EC2 [11])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	ν (-)	z (cm)	T_R (kNm)	$T_{R,m\acute{a}x}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B7UR1	Cheia	0,99	0,46	24,41	17,73	63,35	17,73	18,90	1,07
B9UR1	Cheia	0,99	0,44	24,41	17,73	69,59	17,73	21,10	1,19
B12UR1	Cheia	0,99	0,43	24,41	17,73	72,50	17,73	19,40	1,09
B12UR2	Cheia	1,02	0,44	24,41	18,24	70,23	18,24	18,40	1,01
B12UR3	Cheia	0,94	0,44	24,41	20,99	68,27	20,99	22,50	1,07
B12UR4	Cheia	0,89	0,44	24,41	22,99	69,58	22,99	23,70	1,03
B12UR5	Cheia	0,99	0,44	24,41	26,99	70,51	26,99	24,00	0,89
B14UR1	Cheia	0,99	0,39	24,41	17,73	78,13	17,73	21,00	1,18
H-06-12	Cheia	0,67	0,43	39,71	85,80	315,04	85,80	115,10	1,34
H-07-10	Cheia	0,77	0,46	39,71	100,18	304,11	100,18	126,70	1,26
H-07-16	Cheia	0,60	0,46	39,71	129,34	276,96	129,34	144,50	1,12
H-12-12	Cheia	0,94	0,43	39,71	121,35	340,88	121,35	155,30	1,28
H-12-16	Cheia	0,80	0,43	39,71	180,47	333,42	180,47	196,00	1,09
H-14-10	Cheia	1,10	0,46	39,71	143,23	312,76	143,23	135,20	0,94
H-20-20	Cheia	0,94	0,43	39,71	273,61	340,89	273,61	239,00	0,87
\bar{x}									1,096
s									0,138
cs									13%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.19 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de resistência normal (EC2 [11])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	ν (-)	z (cm)	T_R (kNm)	$T_{R,m\acute{a}x}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
D3	Vazada	0,79	0,55	31,75	40,44	71,55	40,44	39,11	0,97
D4	Vazada	1,01	0,55	31,75	68,14	78,55	68,14	47,93	0,70
T0	Vazada	0,67	0,51	42,00	160,90	316,04	160,90	185,50	1,15
T1	Vazada	1,02	0,53	42,00	148,85	310,92	148,85	140,01	0,94
T2	Vazada	0,90	0,53	42,00	124,81	277,50	124,81	143,10	1,15
T5	Vazada	1,34	0,51	72,00	161,23	440,03	161,23	156,88	0,97
VH1	Vazada	1,01	0,58	24,40	23,65	73,35	23,65	21,79	0,92
VH2 ⁽¹⁾	Vazada	2,01	0,58	24,40	94,61	58,45	58,45	34,50	0,59
A1	Vazada	0,97	0,50	50,19	119,57	700,33	119,57	150,79	1,26
A2	Vazada	1,00	0,51	49,33	249,58	729,56	249,58	254,08	1,02
A3	Vazada	1,02	0,51	49,10	335,14	738,68	335,14	299,92	0,89
A095c	Vazada	0,99	0,53	56,60	125,83	774,49	125,83	209,98	1,67
A120a	Vazada	0,49	0,55	57,12	100,02	361,99	100,02	215,25	2,15
B065b	Vazada	0,50	0,53	61,80	304,68	437,30	304,68	278,00	0,91
B080a	Vazada	1,00	0,51	60,90	340,57	768,86	340,57	300,66	0,88
B110a	Vazada	0,59	0,50	56,37	116,04	615,98	116,04	237,48	2,05
\bar{x}									1,139
s									0,445
cs									39%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.20 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de alta resistência (EC2 [11])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	ν (-)	z (cm)	T_R (kNm)	$T_{R,m\acute{a}x}$ (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
A4	Vazada	0,99	0,49	49,57	444,79	615,98	444,79	368,22	0,83
A5	Vazada	0,95	0,49	49,59	557,06	615,98	557,06	412,24	0,74
B2	Vazada	1,00	0,45	49,20	262,59	615,98	262,59	273,28	1,04
B3	Vazada	1,00	0,43	49,10	462,15	615,98	462,15	355,85	0,77
B4	Vazada	0,96	0,43	48,77	590,89	615,98	590,89	437,85	0,74
B5	Vazada	0,95	0,44	48,33	715,80	615,98	615,98	456,19	0,74
C1	Vazada	0,97	0,40	50,31	120,57	615,98	120,57	151,76	1,26
C2	Vazada	0,99	0,39	49,96	248,19	615,98	248,19	266,14	1,07
C3	Vazada	0,97	0,40	49,75	454,61	615,98	454,61	351,17	0,77
C4	Vazada	0,97	0,40	49,71	584,98	615,98	584,98	450,31	0,77
C5	Vazada	0,98	0,39	49,62	702,15	615,98	615,98	467,26	0,76
C6	Vazada	1,00	0,41	49,62	924,97	615,98	615,98	521,33	0,85
C065a	Vazada	0,82	0,43	69,60	151,16	615,98	151,16	182,00	1,20
C100a	Vazada	1,00	0,40	59,60	349,68	615,98	349,68	370,15	1,06
D075a	Vazada	1,01	0,39	64,70	355,34	615,98	355,34	339,48	0,96
D090a	Vazada	1,00	0,37	61,70	350,58	615,98	350,58	343,08	0,98
\bar{x}									0,908
s									0,175
cs									19%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.17 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	T_f (kNm)	T_r (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	58,50	62,44	58,50	37,48	0,641
B4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	60,80	83,64	60,80	47,30	0,778
B5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	63,68	114,47	63,68	56,11	0,881
B6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,66	60,08	142,08	60,08	61,64	1,026
B7 [18]	Cheia	0,99	54,19	41,12	41,12	26,87	0,653
B8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	1,48	55,77	61,69	55,77	32,51	0,583
B9 [18]	Cheia	0,45	60,08	41,22	41,22	29,80	0,723
C4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	29,05	52,19	29,05	25,29	0,870
C5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	29,13	69,01	29,13	29,69	1,019
C6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	29,50	88,62	29,50	34,21	1,160
G3 [18]	Cheia	0,67	85,56	72,13	72,13	49,56	0,687
G4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	90,18	94,47	90,18	64,80	0,719
G5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	85,78	127,28	85,78	71,91	0,838
G7 [18]	Cheia	0,67	98,76	72,17	72,17	52,61	0,729
G8 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	90,40	102,38	90,40	73,38	0,812
I3 [18]	Cheia	0,67	93,29	65,46	65,46	45,61	0,697
I4 [18]	Cheia	0,67	93,72	82,38	82,38	58,02	0,704
I5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	93,86	106,87	93,86	70,67	0,753
I6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,66	95,44	139,42	95,44	76,65	0,803
J1 [18]	Cheia	0,67	29,90	28,51	28,51	21,45	0,752
J2 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	30,33	43,14	30,33	29,13	0,960
J3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	35,22	74,07	35,22	35,22	1,000
J4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	34,93	84,72	34,93	40,64	1,163
K2 [18]	Cheia	0,67	31,09	30,13	30,13	23,71	0,787
K3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	29,48	43,75	29,48	28,45	0,965
K4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	29,06	68,24	29,06	35,00	1,204
M1 [18]	Cheia	0,55	62,24	35,72	35,72	30,37	0,850
M2 [18]	Cheia	0,55	63,68	51,21	51,21	40,53	0,791
M3 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,55	55,77	68,35	55,77	43,80	0,785
M4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,55	55,34	89,58	55,34	49,56	0,896
M5 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,55	58,36	119,45	58,36	55,65	0,954
M6 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,51	61,23	123,34	61,23	60,06	0,981
N1 [18]	Cheia	0,68	20,61	11,42	11,42	9,09	0,796
N1a [18]	Cheia	0,68	20,03	11,22	11,22	8,99	0,801
N2 [18]	Cheia	0,68	21,23	19,48	19,48	14,45	0,742
N2a [18]	Cheia	1,20	19,84	10,82	10,82	13,21	1,221
N3 [18]	Cheia	0,67	19,07	16,81	16,81	12,19	0,725
N4 [18] ⁽¹⁾	Cheia	0,67	19,07	25,39	19,07	15,69	0,823
VB2 [18]	Cheia	0,69	74,84	71,69	71,69	42,11	0,587

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.17 (cont.) - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de resistência normal (ACSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	T_f (kNm)	T_r (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
VB3 [26]	Cheia	0,69	110,84	71,69	71,69	46,40	0,647
VB4 [26]	Cheia	0,69	141,17	71,69	71,69	48,54	0,677
VM1 [26]	Cheia	0,68	32,59	16,38	16,38	13,89	0,848
VM2 [26]	Cheia	0,68	102,34	52,93	52,93	39,17	0,740
VM3 [26]	Cheia	0,65	270,44	141,12	141,12	100,80	0,714
VQ1 [26]	Cheia	0,68	56,72	37,33	37,33	21,11	0,565
VQ3 [26]	Cheia	0,68	44,52	30,52	30,52	19,98	0,655
VQ9 [26]	Cheia	0,67	40,69	29,65	29,65	21,90	0,739
VS2-VQ2 [26]	Cheia	0,69	53,86	29,91	29,91	19,53	0,653
VS3 [26]	Cheia	0,69	55,28	44,76	44,76	28,56	0,638
VS4-VQ5 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,69	53,86	59,83	53,86	34,32	0,637
VS9 [26]	Cheia	0,69	49,89	37,54	37,54	21,56	0,574
VS10-VB1 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,69	53,86	75,07	53,86	33,30	0,618
VU1 [26]	Cheia	0,98	55,28	39,63	39,63	23,93	0,604
VU2 [26]	Cheia	0,80	55,28	48,53	48,53	30,37	0,626
VU3 [26]	Cheia	0,60	52,44	48,41	48,41	31,04	0,641
VU4 [26]	Cheia	0,49	52,44	39,63	39,63	25,96	0,655
A2 [26]	Cheia	0,78	44,41	32,01	32,01	22,58	0,706
A3 [26]	Cheia	0,66	44,07	38,77	38,77	27,77	0,716
A4 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,66	43,84	54,21	43,84	34,43	0,785
B3 [26]	Cheia	0,67	37,24	35,29	35,29	25,29	0,717
B4 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,66	37,11	48,98	37,11	31,72	0,855
B5UR1 [26]	Cheia	0,70	37,81	26,99	26,99	19,40	0,719
N-06-06 [26]	Cheia	0,63	183,31	113,45	113,45	79,70	0,703
N-06-12 [26]	Cheia	0,48	183,31	138,66	138,66	95,20	0,687
N-07-10 [26]	Cheia	0,56	172,99	161,90	161,90	111,70	0,690
N-07-16 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,43	172,99	209,01	172,99	117,30	0,678
N-12-12 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,68	183,31	196,09	183,31	116,80	0,637
N-12-16 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,58	183,31	291,63	183,31	138,00	0,753
N-14-10 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,80	172,99	231,46	172,99	125,00	0,723
N-20-20 [26] ⁽¹⁾	Cheia	0,68	183,31	442,16	183,31	158,00	0,862
NBS-43-44 [26]	Cheia	0,67	180,73	69,52	69,52	60,60	0,872
NBS-82-13 [26]	Cheia	0,28	180,73	67,15	67,15	52,90	0,788
SW4-1 [26]	Cheia	0,47	30,06	25,83	25,83	17,30	0,670
\bar{x}							0,776
s							0,148
cs							19%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.18 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção cheia e betões de alta resistência (CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	T_f (kNm)	T_r (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
B7UR1 [24]	Cheia	0,70325	61,6734	26,9865	26,99	18,90	0,700
B9UR1 [24]	Cheia	0,70325	71,6023	26,9865	26,99	21,10	0,782
B12UR1 [24]	Cheia	0,70325	76,9486	26,9865	26,99	19,40	0,719
B12UR2 [24]	Cheia	0,72363	72,7479	27,7689	27,77	18,40	0,663
B12UR3 [24]	Cheia	0,66402	69,5974	31,9448	31,94	22,50	0,704
B12UR4 [24]	Cheia	0,62898	72,4615	34,9879	34,99	23,70	0,677
B12UR5 [24]	Cheia	0,7016	73,2253	41,085	41,09	24,00	0,584
B14UR1 [24]	Cheia	0,70325	89,6461	26,9865	26,99	21,00	0,778
H-06-12 [15]	Cheia	0,48181	405,354	138,66	138,66	115,10	0,830
H-07-10 [15]	Cheia	0,55915	353,201	161,898	161,90	126,70	0,783
H-07-16 [15]	Cheia	0,43311	353,201	209,011	209,01	144,50	0,691
H-12-12 [15]	Cheia	0,68138	405,354	196,095	196,09	155,30	0,792
H-12-16 [15]	Cheia	0,58108	405,354	291,634	291,63	196,00	0,672
H-14-10 [15]	Cheia	0,79941	353,201	231,464	231,46	135,20	0,584
H-20-20 [15] ⁽¹⁾	Cheia	0,68174	405,354	442,161	405,35	239,00	0,590
\bar{x}							0,703
s							0,079
cs							11%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.19 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de resistência normal (CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (-)	T_f (kNm)	T_r (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
D3 [18]	Vazada	0,53	56,77	51,24	51,24	39,11	0,763
D4 [18] ⁽¹⁾	Vazada	0,67	61,18	86,35	61,18	47,93	0,783
T0 [25]	Vazada	0,45	283,59	203,88	203,88	185,50	0,910
T1 [25]	Vazada	0,68	247,24	188,60	188,60	140,01	0,742
T2 [25]	Vazada	0,60	221,92	158,15	158,15	143,10	0,905
T5 [25]	Vazada	0,90	385,53	204,30	204,30	156,88	0,768
VH1 [26]	Vazada	0,68	51,24	29,97	29,97	21,79	0,727
VH2 [26] ⁽¹⁾	Vazada	1,35	51,24	119,88	51,24	34,50	0,673
A1 [7]	Vazada	0,65	592,01	151,51	151,51	150,79	0,995
A2 [7]	Vazada	0,67	613,28	316,24	316,24	254,08	0,803
A3 [7]	Vazada	0,69	617,64	424,65	424,65	299,92	0,706
A095c [23]	Vazada	0,66	554,83	159,44	159,44	209,98	1,317
A120a [23]	Vazada	0,36	451,96	167,28	167,28	215,25	1,287
B065b [23]	Vazada	0,34	441,35	386,07	386,07	278,00	0,720
B080a [23]	Vazada	0,67	643,75	431,54	431,54	300,66	0,697
B110a [23]	Vazada	0,43	761,47	193,72	193,72	237,48	1,226
\bar{x}							0,876
s							0,217
cs							25%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Quadro VI.20 - Previsão da resistência à torção para vigas de secção vazada e betões de alta resistência (CSA A23.3-04 [14])

Viga	Tipo de secção	$\tan \theta$ (—)	T_f (kNm)	T_r (kNm)	$T_{r,calc}$ (kNm)	$T_{r,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{r,exp}}{T_{r,calc}}$
A4 [7]	Vazada	0,66	662,92	563,59	563,59	368,22	0,653
A5 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,64	654,94	705,85	654,94	412,24	0,629
B2 [7]	Vazada	0,67	910,76	332,73	332,73	273,28	0,821
B3 [7]	Vazada	0,67	1035,70	585,59	585,59	355,85	0,608
B4 [7]	Vazada	0,64	1065,66	748,72	748,72	437,85	0,585
B5 [7]	Vazada	0,64	1016,61	907,00	907,00	456,19	0,503
C1 [7]	Vazada	0,65	1120,05	152,78	152,78	151,76	0,993
C2 [7]	Vazada	0,67	1147,14	314,48	314,48	266,14	0,846
C3 [7]	Vazada	0,65	1173,97	576,04	576,04	351,17	0,610
C4 [7]	Vazada	0,65	1189,17	741,23	741,23	450,31	0,608
C5 [7]	Vazada	0,65	1250,59	889,70	889,70	467,26	0,525
C6 [7] ⁽¹⁾	Vazada	0,67	1088,12	1172,04	1088,12	521,33	0,479
C065a [23]	Vazada	0,55	892,81	191,53	191,53	182,00	0,950
C100a [23]	Vazada	0,67	1423,31	443,08	443,08	370,15	0,835
D075a [23]	Vazada	0,67	1035,88	450,26	450,26	339,48	0,754
D090a [23]	Vazada	0,67	1377,05	444,22	444,22	343,08	0,772
\bar{x}							0,698
s							0,158
cs							23%

⁽¹⁾ Prevista rotura frágil

Anexo VII. Limitação da Armadura

Quadro VII.1 - Limite da armadura em vigas com armadura equilibrada
(ACI 318R-89 [1])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (—)
B3 [18]	0,17	1,53	0,15	1,39	1,17	1,633
B4 [18]	0,13	1,16	0,16	1,45	1,62	1,808
B5 [18]	0,09	0,86	0,15	1,43	2,13	1,791
B6 [18]	0,08	0,69	0,15	1,39	2,61	1,445
C4 [18]	0,13	1,44	0,17	1,95	1,76	1,606
C5 [18]	0,10	1,09	0,18	2,00	2,37	2,220
C6 [18]	0,07	0,85	0,19	2,10	3,20	1,648
G3 [18]	0,20	1,48	0,14	1,01	0,88	1,915
G4 [18]	0,15	1,16	0,14	1,08	1,20	1,545
G5 [18]	0,11	0,83	0,14	1,04	1,60	1,775
G7 [18]	0,20	1,58	0,15	1,15	0,94	2,381
G8 [18]	0,14	1,08	0,14	1,09	1,31	1,960
I3 [18]	0,16	1,84	0,15	1,67	1,17	3,093
I4 [18]	0,13	1,46	0,16	1,83	1,62	1,670
I6 [18]	0,08	0,88	0,16	1,79	2,61	2,193
J4 [18]	0,12	0,86	0,16	1,08	1,62	1,656
K2 [18]	0,08	0,67	0,12	0,97	1,03	1,544
K3 [18]	0,10	0,82	0,13	1,01	1,58	1,734
K4 [18]	0,07	0,52	0,12	0,92	2,28	2,207
N1 [18]	0,07	0,53	0,13	1,02	0,62	4,287
N1a [18]	0,07	0,53	0,13	1,02	0,62	4,208
N2 [18]	0,04	0,31	0,14	1,10	1,13	2,101
N3 [18]	0,05	0,35	0,13	0,98	0,90	2,705
N4 [18]	0,07	0,50	0,14	1,01	1,42	2,263
VM2 [26]	0,09	1,18	0,21	2,70	0,65	1,573
VM3 [26]	0,15	2,04	0,20	2,66	0,65	2,018
VQ1 [26]	0,10	0,77	0,12	0,89	0,33	1,207
VQ3 [26]	0,23	2,28	0,31	3,07	0,41	1,185
VQ9 [26]	0,31	3,60	0,50	5,78	0,45	1,202
A2 [27]	0,05	0,60	0,16	1,99	1,08	1,964
A3 [27]	0,10	1,29	0,17	2,21	1,22	3,167
A4 [27]	0,07	0,93	0,17	2,21	1,69	1,456
B3 [27]	0,07	0,68	0,13	1,20	1,26	2,028
B4 [27]	0,05	0,49	0,13	1,20	1,73	1,866
B12UR3 [24]	0,09	1,35	0,13	1,99	1,04	3,138
H-14-10 [15]	0,10	1,38	0,10	1,48	1,38	3,796

Quadro VII.1 - Limite da armadura em vigas com armadura equilibrada
(ACI 318R-89 [1])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (—)
N-14-10 [15]	0,10	0,96	0,10	1,03	1,38	2,275
NBS-43-44 [13]	0,21	2,16	0,13	1,32	0,44	4,594
T1 [25]	0,27	1,90	0,18	1,26	0,75	1,509
T2 [25]	0,27	2,12	0,17	1,33	0,71	2,338
VH1 [26]	0,12	0,90	0,14	1,04	0,33	1,213
VH2 [26]	0,06	0,45	0,14	1,04	0,67	1,943
A1 [7]	0,15	1,26	0,10	0,84	0,19	3,446
A2 [7]	0,12	1,14	0,09	0,85	0,37	2,216
A3 [7]	0,14	1,32	0,09	0,83	0,49	1,465
A4 [7]	0,10	1,06	0,08	0,88	0,65	1,535
A5 [7]	0,12	1,25	0,09	0,92	0,83	1,452
B2 [7]	0,11	1,32	0,09	1,04	0,40	1,727
B3 [7]	0,10	1,26	0,09	1,07	0,67	1,394
B4 [7]	0,12	1,53	0,09	1,20	0,89	1,321
C1 [7]	0,15	1,70	0,10	1,14	0,19	1,797
C2 [7]	0,12	1,53	0,09	1,13	0,37	1,546
C3 [7]	0,11	1,35	0,09	1,09	0,63	1,190
C4 [7]	0,12	1,52	0,09	1,15	0,86	1,209
C5 [7]	0,10	1,30	0,09	1,20	1,05	1,204
C6 [7]	0,07	0,92	0,08	1,09	1,34	1,301
C100a [23]	0,18	2,89	0,11	1,77	0,79	2,309
D090a [23]	0,18	2,64	0,11	1,61	0,79	2,809

Quadro VII.2 - Limite da armadura em vigas com armadura não equilibrada (ACI 318R-89 [1])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,max}$ (cm^2)	$A_{l,min}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,max}$ (%)	$\rho_{l,min}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\rho_{l,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (-)
B7 [18]	0,17	1,50	0,88	0,16	1,37	0,09	1,17	0,53	2,634
B8 [18]	0,08	0,68	-13,07	0,16	1,38	-1,35	2,61	0,53	1,472
B9 [18]	0,21	1,91	7,06	0,16	1,44	0,73	0,54	1,17	2,508
I5 [18]	0,10	1,12	-8,02	0,16	1,86	-0,83	2,13	2,11	2,316
J1 [18]	0,20	1,31	6,75	0,15	0,99	0,70	0,54	0,53	2,187
J2 [18]	0,13	0,87	4,17	0,16	1,02	0,43	0,83	0,83	1,980
J3 [18]	0,14	1,00	-1,28	0,13	0,91	-0,13	1,17	1,17	1,597
M1 [18]	0,20	1,86	6,69	0,15	1,44	0,69	0,55	0,83	3,120
M2 [18]	0,14	1,31	4,33	0,15	1,44	0,45	0,78	1,17	1,808
M3 [18]	0,19	1,67	1,84	0,16	1,38	0,19	1,07	1,60	1,554
M4 [18]	0,14	1,26	-1,47	0,16	1,39	-0,15	1,42	2,11	1,842
M5 [18]	0,11	0,97	-5,78	0,15	1,36	-0,60	1,81	2,67	1,711
M6 [18]	0,11	1,05	-5,15	0,16	1,46	-0,53	1,81	3,16	1,170
N2a [18]	0,09	0,68	0,08	0,14	1,05	0,02	1,10	1,11	2,708
VB2 [26]	0,07	0,76	6,87	0,17	1,84	0,65	0,71	0,66	1,225
VB3 [26]	0,07	0,92	6,87	0,17	2,24	0,65	0,71	0,66	1,404
VB4 [26]	0,07	1,04	6,87	0,17	2,53	0,65	0,71	0,66	1,446
VM1 [26]	0,04	0,53	4,72	0,21	2,76	1,00	0,66	0,64	1,369
VS2-VQ2 [26]	0,18	1,61	14,05	0,21	1,96	1,33	0,37	0,35	1,524
VS3 [26]	0,12	1,10	12,13	0,21	1,98	1,15	0,55	0,52	1,075
VS4-VQ5 [26]	0,09	0,81	10,15	0,21	1,96	0,96	0,74	0,69	1,153
VS9 [26]	0,13	1,18	9,90	0,16	1,43	0,94	0,35	0,33	1,259
VS10-VB1 [26]	0,07	0,61	6,18	0,16	1,48	0,59	0,70	0,66	1,144
VU1 [26]	0,09	0,80	10,43	0,21	1,94	0,99	0,68	0,32	1,589
VU2 [26]	0,09	0,80	10,43	0,21	1,94	0,99	0,68	0,48	1,141
VU3 [26]	0,11	1,05	12,25	0,21	1,89	1,16	0,51	0,64	1,166
VU4 [26]	0,17	1,56	14,02	0,21	1,89	1,33	0,34	0,64	1,320
B5UR1 [24]	0,10	1,12	0,60	0,13	1,44	0,10	0,92	0,83	2,823
B7UR1 [24]	0,10	1,43	0,60	0,13	1,84	0,10	0,92	0,83	5,061
B9UR1 [24]	0,10	1,54	0,60	0,13	1,98	0,10	0,92	0,83	1,605
B12UR1 [24]	0,10	1,59	0,60	0,13	2,06	0,10	0,92	0,83	3,478
B12UR4 [24]	0,08	1,33	-0,32	0,13	2,07	-0,05	1,10	1,25	2,814
B12UR5 [24]	0,06	1,02	-2,38	0,13	2,04	-0,39	1,41	1,29	2,505
H-06-12 [15]	0,15	2,25	7,01	0,13	1,93	0,40	0,61	1,18	4,413
H-07-10 [15]	0,11	1,55	2,65	0,10	1,48	0,15	0,68	0,97	2,562
H-07-16 [15]	0,11	1,55	2,65	0,10	1,48	0,15	0,68	1,62	2,463
H-12-12 [15]	0,07	1,13	-3,64	0,13	1,93	-0,21	1,22	1,18	3,396
H-12-16 [15]	0,06	0,89	-7,37	0,10	1,52	-0,42	1,22	1,62	2,383

Quadro VII.1 (cont.) - Limite da armadura em vigas com armadura não equilibrada (ACI 318R-89 [1])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$A_{l,min}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{l,min}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\rho_{l,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (-)
H-20-20 [15]	0,06	0,91	-22,25	0,09	1,41	-1,27	2,01	1,95	1,747
N-06-06 [15]	0,14	1,41	5,81	0,12	1,21	0,33	0,61	0,69	2,848
N-06-12 [15]	0,15	1,51	7,01	0,13	1,30	0,40	0,61	1,18	2,920
N-07-10 [15]	0,11	1,09	2,65	0,10	1,03	0,15	0,68	0,97	2,586
N-07-16 [15]	0,11	1,09	2,65	0,10	1,03	0,15	0,68	1,62	1,736
N-12-12 [15]	0,07	0,76	-3,64	0,13	1,30	-0,21	1,22	1,18	3,111
N-12-16 [15]	0,06	0,60	-7,37	0,10	1,02	-0,42	1,22	1,62	2,781
N-20-20 [15]	0,06	0,61	-22,25	0,09	0,95	-1,27	2,01	1,95	2,526
NBS-82-13 [13]	0,23	2,38	12,19	0,10	1,07	0,70	0,14	0,81	2,998
SW4-1 [29]	0,11	1,30	0,58	0,08	0,96	0,09	0,58	1,16	2,188
D3 [18]	0,16	1,47	4,43	0,15	1,34	0,46	1,17	1,17	1,547
D4 [18]	0,12	1,15	-3,80	0,15	1,44	-0,39	1,62	1,60	1,437
T0 [25]	0,27	2,48	7,38	0,17	1,55	0,30	0,71	1,29	1,854
T5 [25]	0,29	1,99	-0,31	0,17	1,20	-0,01	0,68	0,31	2,425
B5 [7]	0,09	1,31	-20,59	0,09	1,26	-0,57	1,09	1,12	1,359
A095c [23]	0,30	2,95	34,14	0,14	1,40	0,97	0,61	0,37	3,316
A120a [23]	0,32	2,76	42,39	0,11	0,99	1,17	0,46	0,55	2,533
B065b [23]	0,25	1,91	11,70	0,12	0,90	0,33	0,61	1,43	1,549
B080a [23]	0,19	1,91	1,57	0,12	1,17	0,04	0,79	0,79	2,309
B110a [23]	0,28	3,28	32,76	0,12	1,34	0,93	0,53	0,57	2,661
D075a [23]	0,18	2,03	5,71	0,11	1,24	0,16	0,79	0,78	2,281

Quadro VII.3 - Limite da armadura em vigas com armadura equilibrada (ACI 318R-11 [2])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (-)
B3 [18]	0,17	0,90	0,15	0,82	1,17	1,633
B4 [18]	0,13	0,69	0,16	0,86	1,62	1,808
B5 [18]	0,09	0,51	0,15	0,85	2,13	1,791
B6 [18]	0,08	0,40	0,15	0,81	2,61	1,445
C4 [18]	0,13	0,54	0,17	0,74	1,76	1,606
C5 [18]	0,10	0,41	0,18	0,76	2,37	2,220
C6 [18]	0,07	0,32	0,19	0,80	3,20	1,648
G3 [18]	0,20	1,17	0,14	0,80	0,88	1,915
G4 [18]	0,15	0,92	0,14	0,85	1,20	1,545
G5 [18]	0,11	0,66	0,14	0,82	1,60	1,775
G7 [18]	0,20	1,25	0,15	0,91	0,94	2,381
G8 [18]	0,14	0,85	0,14	0,86	1,31	1,960
I3 [18]	0,20	1,09	0,18	0,99	1,17	3,093
I4 [18]	0,15	0,87	0,19	1,09	1,62	1,670
I6 [18]	0,10	0,55	0,20	1,10	2,61	2,193
J4 [18]	0,12	0,51	0,16	0,64	1,62	1,656
K2 [18]	0,08	0,52	0,12	0,76	1,03	1,544
K3 [18]	0,10	0,64	0,13	0,78	1,58	1,734
K4 [18]	0,07	0,41	0,12	0,72	2,28	2,207
N1 [18]	0,07	0,42	0,13	0,82	0,62	4,287
N1a [18]	0,07	0,43	0,13	0,82	0,62	4,208
N2 [18]	0,04	0,25	0,14	0,88	1,13	2,101
N3 [18]	0,05	0,28	0,13	0,78	0,90	2,705
N4 [18]	0,07	0,40	0,14	0,81	1,42	2,263
VM2 [26]	0,10	0,36	0,23	0,82	0,65	1,573
VM3 [26]	0,18	0,60	0,23	0,78	0,65	2,018
VQ1 [26]	0,10	0,40	0,12	0,46	0,33	1,207
VQ3 [26]	0,23	0,42	0,31	0,56	0,41	1,185
VQ9 [26]	0,31	0,35	0,50	0,56	0,45	1,202
A2 [27]	0,05	0,29	0,18	0,96	1,08	1,964
A3 [27]	0,11	0,51	0,19	0,87	1,22	3,167
A4 [27]	0,08	0,36	0,19	0,86	1,69	1,456
B3 [27]	0,08	0,48	0,14	0,85	1,26	2,028
B4 [27]	0,06	0,34	0,14	0,83	1,73	1,866
B12UR3 [24]	0,13	0,72	0,20	1,05	1,04	3,138
H-14-10 [15]	0,14	0,94	0,15	1,01	1,38	3,796
N-14-10 [15]	0,10	0,66	0,11	0,71	1,38	2,275
NBS-43-44 [13]	0,23	1,24	0,14	0,76	0,44	4,594
T1 [25]	0,28	0,99	0,19	0,65	0,75	1,509
T2 [25]	0,28	0,87	0,18	0,55	0,71	2,338
VH1 [26]	0,12	0,47	0,14	0,54	0,33	1,213
VH2 [26]	0,06	0,47	0,14	1,09	0,67	1,943
A1 [7]	0,18	0,62	0,12	0,42	0,19	3,446
A2 [7]	0,15	0,56	0,11	0,41	0,37	2,216
A3 [7]	0,17	0,67	0,11	0,42	0,49	1,465

Quadro VII.3 - Limite da armadura em vigas com armadura equilibrada (ACI 318R-11 [2])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (—)
A4 [7]	0,14	0,50	0,11	0,41	0,65	1,535
A5 [7]	0,16	0,57	0,12	0,42	0,83	1,452
B2 [7]	0,17	0,65	0,13	0,51	0,40	1,727
B3 [7]	0,16	0,63	0,14	0,53	0,67	1,394
B4 [7]	0,19	0,71	0,15	0,56	0,89	1,321
C1 [7]	0,25	0,85	0,17	0,57	0,19	1,797
C2 [7]	0,21	0,74	0,15	0,55	0,37	1,546
C3 [7]	0,19	0,67	0,15	0,53	0,63	1,190
C4 [7]	0,21	0,75	0,16	0,57	0,86	1,209
C5 [7]	0,18	0,64	0,16	0,59	1,05	1,204
C6 [7]	0,12	0,44	0,14	0,52	1,34	1,301
C100a [23]	0,32	1,72	0,19	1,05	0,79	2,309
D090a [23]	0,34	1,54	0,21	0,94	0,79	2,809

Quadro VII.4 - Limite da armadura em vigas com armadura equilibrada
(ACI 318R-11 [2])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$A_{l,min}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{l,min}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\rho_{l,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (—)
B7 [18]	0,17	1,32	-4,95	0,16	1,20	-0,51	1,17	0,53	2,634
B8 [18]	0,08	0,89	-18,77	0,16	1,80	-1,94	2,61	0,53	1,472
B9 [18]	0,21	0,76	1,55	0,16	0,58	0,16	0,54	1,17	2,508
I5 [18]	0,12	0,67	-11,95	0,20	1,10	-1,23	2,13	2,11	2,316
J1 [18]	0,20	0,78	-0,56	0,15	0,59	-0,06	0,54	0,53	2,187
J2 [18]	0,13	0,52	-3,27	0,16	0,61	-0,34	0,83	0,83	1,980
J3 [18]	0,14	0,59	-7,10	0,13	0,54	-0,73	1,17	1,17	1,597
M1 [18]	0,20	0,90	1,41	0,15	0,69	0,15	0,55	0,83	3,120
M2 [18]	0,14	0,63	-0,82	0,15	0,70	-0,08	0,78	1,17	1,808
M3 [18]	0,19	0,80	-3,87	0,16	0,67	-0,40	1,07	1,60	1,554
M4 [18]	0,14	0,61	-7,26	0,16	0,67	-0,75	1,42	2,11	1,842
M5 [18]	0,11	0,47	-11,12	0,15	0,66	-1,15	1,81	2,67	1,711
M6 [18]	0,11	0,47	-10,61	0,16	0,65	-1,10	1,81	3,16	1,170
N2a [18]	0,09	0,97	-2,04	0,14	1,50	-0,44	1,10	1,11	2,708
VB2 [26]	0,07	0,23	-3,31	0,17	0,57	-0,31	0,71	0,66	1,225
VB3 [26]	0,08	0,29	-2,41	0,19	0,69	-0,23	0,71	0,66	1,404
VB4 [26]	0,09	0,32	-1,76	0,22	0,78	-0,17	0,71	0,66	1,446
VM1 [26]	0,05	0,16	-0,33	0,23	0,83	-0,07	0,66	0,64	1,369
VS2-VQ2 [26]	0,18	0,50	0,51	0,21	0,60	0,05	0,37	0,35	1,524
VS3 [26]	0,12	0,34	-1,35	0,21	0,61	-0,13	0,55	0,52	1,075
VS4-VQ5 [26]	0,09	0,25	-3,39	0,21	0,60	-0,32	0,74	0,69	1,153
VS9 [26]	0,13	0,36	-0,49	0,16	0,44	-0,05	0,35	0,33	1,259
VS10-VB1 [26]	0,07	0,19	-4,08	0,16	0,46	-0,39	0,70	0,66	1,144
VU1 [26]	0,09	0,35	-2,78	0,21	0,85	-0,26	0,68	0,32	1,589
VU2 [26]	0,09	0,29	-2,78	0,21	0,69	-0,26	0,68	0,48	1,141
VU3 [26]	0,11	0,28	-1,08	0,21	0,50	-0,10	0,51	0,64	1,166
VU4 [26]	0,17	0,34	0,69	0,21	0,41	0,07	0,34	0,64	1,320
B5UR1 [24]	0,11	0,62	-1,48	0,14	0,81	-0,24	0,92	0,83	2,823
B7UR1 [24]	0,14	0,80	-0,32	0,18	1,03	-0,05	0,92	0,83	5,061
B9UR1 [24]	0,15	0,86	0,10	0,20	1,11	0,02	0,92	0,83	1,605
B12UR1 [24]	0,16	0,89	0,31	0,20	1,15	0,05	0,92	0,83	3,478
B12UR4 [24]	0,13	0,67	-0,80	0,21	1,03	-0,13	1,10	1,25	2,814
B12UR5 [24]	0,10	0,57	-2,83	0,20	1,14	-0,46	1,41	1,29	2,505
H-06-12 [15]	0,24	0,93	5,05	0,20	0,79	0,29	0,61	1,18	4,413
H-07-10 [15]	0,16	0,74	0,19	0,15	0,71	0,01	0,68	0,97	2,562
H-07-16 [15]	0,16	0,57	0,19	0,15	0,55	0,01	0,68	1,62	2,463
H-12-12 [15]	0,12	0,65	-5,60	0,20	1,12	-0,32	1,22	1,18	3,396
H-12-16 [15]	0,09	0,44	-8,92	0,16	0,75	-0,51	1,22	1,62	2,383
H-20-20 [15]	0,09	0,53	-23,69	0,15	0,82	-1,35	2,01	1,95	1,747
N-06-06 [15]	0,15	0,76	-0,81	0,13	0,65	-0,05	0,61	0,69	2,848

Quadro VII.4 - Limite da armadura em vigas com armadura equilibrada
(ACI 318R-11 [2])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$A_{l,min}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{l,min}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\rho_{l,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (—)
N-06-12 [15]	0,16	0,62	-0,09	0,14	0,53	-0,01	0,61	1,18	2,920
N-07-10 [15]	0,11	0,52	-3,42	0,11	0,49	-0,20	0,68	0,97	2,586
N-07-16 [15]	0,11	0,40	-3,42	0,11	0,38	-0,20	0,68	1,62	1,736
N-12-12 [15]	0,08	0,44	-10,74	0,14	0,75	-0,61	1,22	1,18	3,111
N-12-16 [15]	0,06	0,30	-12,97	0,11	0,51	-0,74	1,22	1,62	2,781
N-20-20 [15]	0,06	0,35	-27,45	0,10	0,55	-1,57	2,01	1,95	2,526
NBS-82-13 [13]	0,25	0,57	6,22	0,11	0,26	0,36	0,14	0,81	2,998
SW4-1 [29]	0,14	0,54	0,13	0,10	0,40	0,02	0,58	1,16	2,188
D3 [18]	0,16	0,66	-0,77	0,15	0,60	-0,08	1,17	1,17	1,547
D4 [18]	0,12	0,65	-8,93	0,15	0,82	-0,92	1,62	1,60	1,437
T0 [25]	0,33	0,77	5,58	0,21	0,48	0,22	0,71	1,29	1,854
T5 [25]	0,35	1,02	-0,77	0,21	0,61	-0,02	0,68	0,31	2,425
B5 [7]	0,15	0,57	-18,20	0,14	0,55	-0,51	1,09	1,12	1,359
A095c [23]	0,32	1,77	10,65	0,15	0,84	0,30	0,61	0,37	3,316
A120a [23]	0,32	0,91	11,19	0,11	0,33	0,31	0,46	0,55	2,533
B065b [23]	0,28	0,55	7,70	0,13	0,26	0,22	0,61	1,43	1,549
B080a [23]	0,23	1,12	-5,92	0,14	0,68	-0,16	0,79	0,79	2,309
B110a [23]	0,36	1,28	14,16	0,15	0,53	0,40	0,53	0,57	2,661
D075a [23]	0,32	1,20	2,84	0,20	0,73	0,08	0,79	0,78	2,281

Quadro VII.8 - Limite da armadura em vigas com "volume" de armadura equilibrada (CSA A23.3-04[14])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (—)
J1 [18]	0,27	0,74	0,20	0,56	0,54	2,187
J2 [18]	0,18	0,49	0,21	0,58	0,83	1,980
J3 [18]	0,20	0,61	0,19	0,55	1,17	1,597
J4 [18]	0,18	0,53	0,22	0,66	1,62	1,656
VQ1 [26]	0,15	0,43	0,18	0,50	0,33	1,207
VQ3 [26]	0,34	0,44	0,45	0,59	0,41	1,185
VQ9 [26]	0,48	0,38	0,78	0,61	0,45	1,202
VS2-VQ2 [26]	0,27	0,54	0,32	0,66	0,37	1,524
VS3 [26]	0,18	0,37	0,33	0,67	0,55	1,075
VS4-VQ5 [26]	0,13	0,27	0,32	0,66	0,74	1,153
VS9 [26]	0,19	0,38	0,24	0,46	0,35	1,259
VS10-VB1 [26]	0,10	0,21	0,24	0,50	0,70	1,144
VU3 [26]	0,17	0,30	0,31	0,54	0,51	1,166
VU4 [26]	0,26	0,37	0,31	0,44	0,34	1,320
N-07-10 [15]	0,22	0,75	0,21	0,71	0,68	2,586
N-07-16 [15]	0,22	0,58	0,21	0,55	0,68	1,736
NBS-82-13 [13]	0,48	0,84	0,22	0,38	0,14	2,998
SW4-1 [29]	0,26	0,90	0,19	0,67	0,58	2,188
VH1 [26]	0,18	0,49	0,21	0,56	0,33	1,213
A1 [7]	0,35	1,08	0,24	0,72	0,19	3,446
A2 [7]	0,28	0,96	0,21	0,71	0,37	2,216
A3 [7]	0,33	1,14	0,20	0,71	0,49	1,465
A120a [23]	0,58	1,19	0,21	0,43	0,46	2,533
B065b [23]	0,54	0,86	0,26	0,41	0,61	1,549
B3 [18]	0,31	1,19	0,28	1,09	1,17	1,633
B4 [18]	0,24	0,93	0,30	1,16	1,62	1,808
B5 [18]	0,18	0,71	0,29	1,17	2,13	1,791
B6 [18]	0,14	0,54	0,28	1,09	2,61	1,445
B9 [18]	0,39	1,02	0,30	0,78	0,54	2,508
C4 [18]	0,23	0,71	0,32	0,97	1,76	1,606
C5 [18]	0,18	0,54	0,32	0,99	2,37	2,220
C6 [18]	0,14	0,42	0,34	1,05	3,20	1,648
G3 [18]	0,36	1,51	0,25	1,03	0,88	1,915
G4 [18]	0,28	1,22	0,26	1,13	1,20	1,545
G5 [18]	0,20	0,86	0,25	1,07	1,60	1,775
G7 [18]	0,39	1,74	0,28	1,27	0,94	2,381
G8 [18]	0,26	1,13	0,27	1,14	1,31	1,960
K2 [18]	0,16	0,72	0,23	1,05	1,03	1,544
K3 [18]	0,19	0,86	0,24	1,05	1,58	1,734
K4 [18]	0,12	0,54	0,22	0,96	2,28	2,207
M1 [18]	0,38	1,22	0,29	0,95	0,55	3,120
M2 [18]	0,27	0,87	0,30	0,96	0,78	1,808

Quadro VII.8 (cont.)- Limite da armadura em vigas com "volume" de armadura equilibrada (CSA A23-04 [14])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (—)
M3 [18]	0,34	1,04	0,28	0,86	1,07	1,554
M4 [18]	0,26	0,79	0,28	0,87	1,42	1,842
M5 [18]	0,20	0,62	0,28	0,87	1,81	1,711
M6 [18]	0,21	0,63	0,30	0,89	1,81	1,170
N1 [18]	0,13	0,58	0,25	1,11	0,62	4,287
N1a [18]	0,13	0,57	0,25	1,10	0,62	4,208
N2 [18]	0,08	0,35	0,27	1,22	1,13	2,101
N3 [18]	0,09	0,36	0,24	1,01	0,90	2,705
N4 [18]	0,12	0,53	0,25	1,05	1,42	2,263
VB2 [26]	0,13	0,30	0,30	0,73	0,71	1,225
VB3 [26]	0,15	0,45	0,37	1,08	0,71	1,404
VB4 [26]	0,17	0,57	0,42	1,38	0,71	1,446
VM1 [26]	0,09	0,25	0,45	1,29	0,66	1,369
VM2 [26]	0,19	0,54	0,45	1,23	0,65	1,573
VM3 [26]	0,34	0,95	0,44	1,23	0,65	2,018
VU1 [26]	0,13	0,39	0,32	0,94	0,68	1,589
VU2 [26]	0,13	0,32	0,32	0,76	0,68	1,141
B4 [27]	0,11	0,53	0,28	1,29	1,73	1,866
B5UR1 [24]	0,21	0,98	0,28	1,27	0,92	2,823
H-07-16 [15]	0,31	1,19	0,30	1,13	0,68	2,463
N-06-06 [15]	0,28	1,13	0,24	0,97	0,61	2,848
N-06-12 [15]	0,31	0,93	0,26	0,80	0,61	2,920
N-12-12 [15]	0,15	0,66	0,26	1,12	1,22	3,111
N-12-16 [15]	0,12	0,44	0,21	0,76	1,22	2,781
N-14-10 [15]	0,19	0,95	0,21	1,02	1,38	2,275
N-20-20 [15]	0,12	0,53	0,19	0,82	2,01	2,526
NBS-43-44 [13]	0,43	1,83	0,27	1,12	0,44	4,594
D3 [18]	0,30	0,88	0,27	0,80	1,17	1,547
D4 [18]	0,24	0,90	0,29	1,13	1,62	1,437
T0 [25]	0,64	1,28	0,40	0,80	0,71	1,854
T1 [25]	0,55	1,47	0,36	0,97	0,75	1,509
T2 [25]	0,55	1,30	0,34	0,81	0,71	2,338
T5 [25]	0,69	1,74	0,41	1,05	0,68	2,425
VH2 [26]	0,09	0,49	0,21	1,13	0,67	1,943
A4 [7]	0,26	0,92	0,22	0,76	0,65	1,535
A5 [7]	0,31	1,04	0,23	0,76	0,83	1,452
B2 [7]	0,32	1,35	0,26	1,07	0,40	1,727
B3 [7]	0,31	1,38	0,26	1,17	0,67	1,394
B5 [7]	0,28	1,25	0,27	1,20	1,09	1,359
C2 [7]	0,40	1,80	0,30	1,33	0,37	1,546
C3 [7]	0,36	1,59	0,29	1,28	0,63	1,190
C6 [7]	0,23	1,04	0,27	1,22	1,34	1,301

Quadro VII.1 - Limite da armadura em vigas com "volume" de armadura equilibrada (MC10 [1])

Viga	$A_{t,min}$ (cm^2)	$A_{t,máx}$ (cm^2)	$\rho_{t,min}$ (%)	$\rho_{t,máx}$ (%)	$\rho_{t,ef}$ (%)	$\mu_{\theta,exp}$ (—)
A095c [23]	0,62	2,63	0,29	1,24	0,61	3,316
B080a [23]	0,45	1,90	0,28	1,16	0,79	2,309
B110a [23]	0,69	2,23	0,28	0,91	0,53	2,661
B7 [18]	0,31	1,68	0,28	1,53	1,17	2,634
I3 [18]	0,38	1,82	0,34	1,65	1,17	3,093
A2 [27]	0,10	0,44	0,34	1,48	1,08	1,964
A3 [27]	0,22	0,80	0,37	1,37	1,22	3,167
A4 [27]	0,16	0,57	0,37	1,35	1,69	1,456
B3 [27]	0,16	0,74	0,28	1,32	1,26	2,028
H-07-10 [15]	0,31	1,53	0,30	1,46	0,68	2,562
H-12-16 [15]	0,18	0,98	0,31	1,67	1,22	2,383
C1 [18]	0,49	2,03	0,33	1,36	0,19	1,797
C4 [18]	0,41	1,79	0,31	1,36	0,86	1,209
C5 [18]	0,34	1,57	0,32	1,45	1,05	1,204
B8 [18]	0,14	1,15	0,28	2,33	2,61	1,472
I4 [18]	0,30	1,45	0,37	1,82	1,62	1,670
I5 [18]	0,23	1,12	0,38	1,85	2,13	2,316
I6 [18]	0,18	0,87	0,37	1,76	2,61	2,193
N2a [18]	0,17	1,29	0,26	2,00	1,10	2,708
B7UR1 [24]	0,27	1,60	0,35	2,07	0,92	5,061
B12UR3 [24]	0,26	1,53	0,38	2,24	1,04	3,138
B12UR4 [24]	0,26	1,45	0,40	2,25	1,10	2,814
H-06-12 [15]	0,45	2,05	0,39	1,76	0,61	4,413
H-12-12 [15]	0,23	1,45	0,39	2,49	1,22	3,396
H-14-10 [15]	0,28	1,95	0,30	2,08	1,38	3,796
H-20-20 [15]	0,18	1,17	0,28	1,82	2,01	1,747
B4 [18]	0,36	1,59	0,28	1,25	0,89	1,321
D075a [23]	0,62	2,93	0,38	1,78	0,79	2,281
B9UR1 [24]	0,30	1,86	0,38	2,40	0,92	1,605
B12UR1 [24]	0,31	2,00	0,40	2,58	0,92	3,478
B12UR5 [24]	0,20	1,25	0,39	2,49	1,41	2,505
C100a [23]	0,61	4,10	0,37	2,50	0,79	2,309
D090a [23]	0,66	3,95	0,40	2,41	0,79	2,809